



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
*PIPE - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência
dos Materiais*
Setor de Tecnologia

JASONIAS NEVES ANDRADE DA SILVA

**Estudo Teórico e Experimental do Efeito do Ciclo
Térmico no Pannel Refrigerado de Forno Elétrico a Arco**

CURITIBA
JUNHO/2014

JASONIAS NEVES ANDRADE DA SILVA

**Estudo Teórico e Experimental do Efeito do Ciclo
Térmico no Paineira Refrigeraao de Forno Elétrico a Arco**

Dissertaçaõ apresentada como requisito de nota parcial
à obtençaõ do grau de Mestre ao Programa de Pós-
Graduaçaõ em Engenharia (PIPE), Área de
Concentraçaõ de Engenharia e Ciência de Materiais,
Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Haroldo de Araújo Ponte

Curitiba

2014

S586e

Silva, Jasonias Neves Andrade da.

Estudo teórico e experimental do efeito do ciclo térmico no painel refrigerado de forno elétrico a arco./ Jasonias Neves Andrade da Silva. – Curitiba, 2014.
111f. : il. [algumas color.]; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências e Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais – PIPE, 2014.

Orientador: Haroldo de Araújo Ponte.

Bibliografia: p. 109-111.

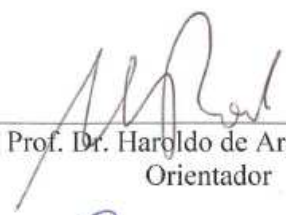


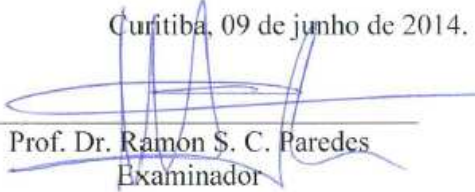
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais- PIPE
Setor de Tecnologia

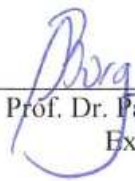
RELATÓRIO DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

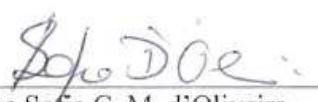
Aos nove dias do mês de junho de 2014, na Sala de Aula do PIPE - no Centro Politécnico - UFPR, foi instalada pela Prof.^a Dr.^a Ana Sofia C. M. de Oliveira, coordenadora do PIPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, a Banca Examinadora para a ducentésima septuagésima oitava defesa de dissertação de mestrado na área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais. Estiveram presentes no ato, além do coordenador do Curso de Pós-Graduação, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais, foi constituída pelos professores doutores: Prof. Dr. Haroldo de Araújo Ponte (UFPR), Ramon S. C. Paredes (UFPR), Paulo Cesar Borges (PUC-PR). Às 09:00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando o candidato **JASONIAS NEVES ANDRADE DA SILVA** a fazer a apresentação da dissertação de mestrado intitulada **“ESTUDO TEÓRICO E REFRIGERADO DE FORNO ELÉTRICO A ARCO”**. Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de arguição pelos membros participantes. Tendo em vista a dissertação e a arguição, a banca decidiu pela APROVAÇÃO do candidato, (de acordo com a determinação dos artigos 68 e 69 da resolução 65/09 de 09.11.2009).

Curitiba, 09 de junho de 2014.


Prof. Dr. Haroldo de Araújo Ponte
Orientador


Prof. Dr. Ramon S. C. Paredes
Examinador


Prof. Dr. Paulo Cesar Borges
Examinador


Prof.ª Dr.ª Ana Sofia C. M. d'Oliveira
Coordenadora do PIPE

Dedico este trabalho aos meus familiares e a todas as pessoas pelo apoio incondicional e por acreditarem tanto quanto eu na realização dos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a **Deus** pela companhia durante toda minha caminhada...através das pessoas que encontrei, dos amigos que fiz, dos momentos felizes e pela força nos momentos mais difíceis.

Agradeço minha família que me apoiaram e me deram forças para que eu pudesse concluir este trabalho.

Ao meu orientador, Professor Dr. Haroldo de Araújo Ponte, pela oportunidade de trabalho e pela convivência durante estes dois anos. Um período suficiente para desenvolver uma relação de amizade e cooperação para o desenvolvimento dos trabalhos no Laboratório de Eletroquímica de Superfície e Corrosão (LESC).

Agradeço a Gerdau Aços Longos S.A pelo apoio e pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

Aos amigos do Laboratório de Eletroquímica de Superfície e Corrosão da Universidade Federal do Paraná, pelo ambiente de trabalho e por estarem sempre prontos a ajudar.

Ao Professor Dr. Paulo Camargo da Universidade Federal de São Carlos pela ajuda e discussão nas discussões de termodinâmica e AFM.

A todos que leram esta dissertação, pelos comentários, sugestões e pela correção dos erros na nossa língua portuguesa. É importante salientar este agradecimento, pois a leitura deste material nem sempre é uma tarefa animadora, principalmente para pessoas sem muitos conhecimentos da área trabalhada.

RESUMO

As aciarias elétricas no Brasil enfrentam atualmente um enorme desafio: adaptar suas unidades para aumentar o volume de produção e reduzir os custos operacionais para se tornar competitiva frente ao mercado siderúrgico internacional que esta cada vez mais agressivo. Uma forma de superar estes desafios é ter excelência na operação e manutenção dos equipamentos para evitar interrupções na linha de produção, acidentes com perdas pessoal e material. Entretanto, a falta de informação e conhecimento técnico aprofundado em determinado processo da aciaria tem sido um dos principais motivos de grandes perdas e interrupções na produção, com isto, enfraquecendo o mercado interno e possibilitando a entrada de grandes fornecedores estrangeiros. O objetivo deste trabalho foi investigar a influencia do ciclo térmico do forno fusão a arco na perfuração da carcaça spray durante operação. Para tanto foi feito o estudo do comportamento mecânico e microestrutural do aço usado na carcaça spray, comparando resultado obtido por meios de procedimentos analíticos e de volume finitos. Amostras da chapa de Aço Carbono (ASTM A285C), utilizadas no forno e na região de falha, foram removidas para devidas análises. Propriedades mecânicas, análise de microscopia ótica e eletrônica de varredura da chapa de aço carbono, indicaram que a influência do ciclo térmico não teve efeito significativo e que principal fator que deforma ou perfura a chapa esta relacionado com o grande aporte de energia química consequente do rebote da injeção de oxigênio.

Palavras-chave: *Aço Carbono ASTM A285C, Ciclo Térmico Forno Fusão a Arco, Ensaio de Tração, Microscopia Ótica e Eletrônica.*

ABSTRACT

The melt shop in Brazil now face an enormous challenge: to adapt their units to increase production volume and reduce operational costs to become competitive with the international steel market that increasingly aggressive. One way to overcome these challenges is to have excellence in the operation and maintenance of equipment to prevent interruptions in the production line, accidents with personal losses and material. However, the absence of information and indetailed technical knowledge of certain melt shop process has been a key reason of large losses and interruptions in production, thus, weakening the internal market and allowing the entry of large foreign suppliers. The objective of this study was to investigate the influence of thermal cycle furnace the arc melting in drilling shell spray during operation. For both the study of the mechanical and micro structural behavior of steel used in spray shell was done by comparing results obtained by means of analytical and finite volume. Samples of Carbon Steel Plate (ASTM A285C), used in the oven and in the region of failure, were removed for appropriate analyzes. Mechanical properties, analysis of optical and scanning electron microscopy of carbon steel plate microscopy indicated that the influence of thermal cycling had no significant effect and that the main factor that deforms or punch plate is related to the extensive supply of chemical energy resulting from the rebound injection of oxygen.

Key-words: Carbon Steel ASTM A285C, Cycle Thermal Electric Arc Furnace, Test of Traction, Optical Microscopy and Electron.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Foto do Forno Elétrico a Arco após explosão devido vazamento de água	17
Figura 2 - Gráfico referente ao controle de temperatura do painel refrigerado Forno Fusão a Arco	18
Figura 3 – Foto externa e interna da Carcaça refrigerada (Spray) do Forno Elétrico a Arco	18
Figura 4 - Classificação dos Fornos Elétricos a Arco	22
Figura 5 - Potência dos Fornos Elétricos e sua capacidade por corrida	22
Figura 6 - Produtividade dos Fornos Elétricos a Arco	23
Figura 7 - Representação esquemática do Forno Elétrico a Arco	24
Figura 8 - Classificação dos fornos elétricos a arco.....	25
Figura 9 - Energia teórica necessária para fusão e sobreaquecimento do aço a 1650 oC.....	31
Figura 10 – Sistema de Entrada e Saída de energia no Forno Elétrico a Arco.	31
Figura 11 - Perfil do arco elétrico na ponta do eletrodo do forno fusão a arco	34
Figura 12 - Posicionamento dos queimadores e visão das chamas proporcionadas.....	39
Figura 13 - Poder calorífico de diferentes combustíveis.....	40
Figura 14 - Eficiência dos queimadores oxi-gás do forno fusão.....	41
Figura 15 - Posição dos injetores PC em contra fluxo aos gases gerados no FEA.....	43
Figura 16 - Visão do forno em fusão com utilização de pós combustão.....	43
Figura 17 - Fatores de eficiência e equivalentes energéticos.	44
Figura 18 - Fatores que afetam a eficiência térmica dos FEAs.....	45
Figura 19 – Vista interna e externa da carcaça com painel refrigerado do forno fusão a arco..	45
Figura 20 – Vista interna do tubo de refrigeração do painel refrigerado do forno elétrico a arco.	46
Figura 21 - Densidades de calor através de elementos refrigerados típicos em FEAs.....	47
Figura 22 - Representação esquemática de um tubo de painel refrigerado.	47
Figura 23 - Efeitos da velocidade de água no interior de dutos 3” Sch 160.	48
Figura 24 - Painéis refrigerados (sistema spray)	49
Figura 25 – Ilustração da abrangência do spray na zona refrigerada	50
Figura 26 - Ilustração da entrada e saída de água da carcaça spray.....	50
Figura 27 - Ilustração saída de água da carcaça spray.	51
Figura 28 - Característica da água circulante requerida nos painéis e carcaça refrigerada do Forno Fusão.....	52
Figura 29 - Relação dos Componentes Ca e Mg em CaCO_3	53
Figura 30 - Relação entre a temperatura da água e solubilidade da dureza.	53
Figura 31 - Relação entre a temperatura da água e a solubilidade de sais em geral	53
Figura 32 - Imagem típica de incrustação de cálcio em tubulações	54
Figura 33 - Mecanismo de dispersão química para controle de incrustação de cálcio.	55
Figura 34 - Imagem comparativa da água com e sem tratamento por inibidores e dispersantes.	55
Figura 35 - Painel refrigerado tipo caixa	57
Figura 36 - Painel refrigerado tipo Tubo – Desenho ilustrativo	58
Figura 37 - Tubos extrudado utilizado no painel refrigerado do forno elétrico a arco.....	59
Figura 38 - Painéis de cobre na linha de escória da carcaça refrigerada	59

Figura 39 - Painel sobre a bica excêntrica – Cortesia Lumar Metals.....	59
Figura 40 - Blocos de injetores/queimadores – Cortesia Danieli.....	60
Figura 41 - Transferência de calor unidimensional por condução.....	61
Figura 42 - Intervalo de condutividade térmica para substâncias diversas.....	62
Figura 43 - Valores típicos dos coeficientes de transferência de calor por convecção.	64
Figura 44 - Troca por radiação (a) em uma superfície e (b) entre uma superfície e uma vizinhança.....	65
Figura 45 - Aquecimento de painéis refrigerados durante a fusão de três cargas no forno.	67
Figura 46 - Deformação por tração e compressão.....	68
Figura 47 - Deformação por tração e compressão.....	69
Figura 48 – Imagem ilustrando painel refrigerado e ponto perfurado por arco elétrico	70
Figura 49 - Sistema de aterramento do FEA	70
Figura 50 - Ilustração de rebote de oxigênio no painel refrigerado do forno.	71
Figura 51 - Painel de cobre - fusão por arraste de oxigênio	71
Figura 52 - Fusão painel por excesso de calor gerado pelo queimador.....	71
Figura 53 - Fusão do tubo de aço da carcaça pela reação do oxigênio devido rebote.....	72
Figura 54 - Relação entre a energia livre da formação de um óxido de metais puros e temperatura para diversas reações óxido-metal [SCHÜTZE, 2001].....	73
Figura 55 - Diagrama de estabilidade para os óxidos e carbetos de vários elementos a temperatura de 950 °C (SCHÜTZE, 2001).	74
Figura 56 - - Representação esquemática das curvas de oxidação.....	75
Figura 57 - Representação esquemática dos processos de transporte na escala durante o crescimento do óxido (SCHÜTZE, 2001).....	77
Figura 58 – Foto da Carcaça spray e amostra de chapa metálica.....	82
Figura 59 - Especificação química do aço ASTM A285C.....	83
Figura 60 - Desenho mecânico chapa da carcaça Spray	83
Figura 61 - Tabela de reagentes químicos.....	84
Figura 62 - Foto da amostra de escória retirado da carcaça spray região do Cojet	85
Figura 63 - Foto da amostra de aço coletada após refino primário no forno elétrico a arco.....	86
Figura 64 - Máquina de corte Serra fita	86
Figura 65 - Equipamento de corte cutoff – COR80 – Fabricante Arotec.....	87
Figura 66 - Lixadeira e Politriz – Arotec Modelo Aropol	87
Figura 67 - Microscópio ótico e eletrônico de varredura.....	88
Figura 68 - Espectrômetro de emissão óptica (OES) ARL 3460.....	88
Figura 69 - Parâmetros para embutimento a quente, na prensa hidráulica do laboratório.	89
Figura 70 - Amostra de aço ASTM A285C carcaça Spray P2.....	91
Figura 71 - Amostra de aço ASTM A285C carcaça Spray SP1 superior	91
Figura 72 - Composição química do aço ASTM A285C.....	92
Figura 73 - Carcaça spray região do FEA Painel 2 parte superior.....	93
Figura 74 - Microestrutura do metal base sem tratamento térmico. Ataque Nital 2%.....	93
Figura 75 - Imagens de microscopia das amostras de P2 e SP1 da carcaça spray	94
Figura 76 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra SP1 e P2 com aumento de 2500 vezes.....	95
Figura 77 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra painel superior (SP1) com aumento de 500 vezes.	96

Figura 78 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra painel próxima ao injetor de oxigênio (P2) com aumento de 500 vezes.	96
Figura 79 - EDS da chapa do painel P2 próximo ao injetor de oxigênio, região da borda face quente.	97
Figura 80 - EDS da chapa do painel P2 próximo ao injetor de oxigênio, região da borda face fria.	98
Figura 81 - EDS da chapa nova, sem utilização.	99
Figura 82 - Resultado ensaio de tração realizado na chapa da carcaça spray	99
Figura 83 - Tabela de resultado da análise de microdureza das amostras P2 e SP1.	100
Figura 84 - Análise química das amostras coletadas durante o processo de fusão e refino no forno fusão a arco.	101
Figura 85 - Análise química da escória coletada na carcaça spray do forno ao término da corrida.	101
Figura 86 - Resultado analítico da qualidade da água de refrigeração da carcaça spray	101
Figura 87 - Gráfico de temperatura da carcaça spray na região do injetor de oxigênio do quarto furo	102
Figura 88 - Gráfico referente à energia química do forno elétrico a arco.	103
Figura 89 - Ilustração do Sistema de refrigeração da carcaça spray	104
Figura 90 - Gráfico do Fluxo de calor x Velocidade da Chama	104
Figura 91 - Ilustração sobre a dissipação de calor na chapa da carcaça spray	105
Figura 92 - Gráfico simulando a velocidade das gotículas de água na carcaça spray.	105
Figura 93 - Gráfico simulando a velocidade das gotículas de água na carcaça spray.	106
Figura 94 - Gráfico de Temperatura da chapa carcaça spray quando injetor de oxigênio esta operando em modo lança.	106
Figura 95 - – Desenho do bloco injetor de oxigênio no FEA.	107
Figura 96 - Ilustração do Sistema proposto para injeção de gases no FEA.....	108

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15
CAPÍTULO 1 – PROPOSTA	16
1.1 Justificativa	17
1.2 Objetivo Geral	18
1.3 Objetivos Específicos	19
1.4 Método de Pesquisa	19
1.5 Estrutura do Trabalho	20
CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Histórico do Forno Elétrico a Arco	21
2.2 O Forno Elétrico a Arco	23
2.3 Característica e Evolução do Forno Elétrico a Arco	26
2.4 Operação do Forno Elétrico a Arco	27
2.4.1 Fusão da Carga Metálica	28
2.4.2 Refino ou Oxidação do Aço	29
2.4.3 Vazamento do Aço Líquido	30
2.5 Tipos de Energias Utilizadas no FEA	30
2.5.1 Energia Elétrica	33
2.5.2 Energia Química	35
2.5.4 Queimadores Oxi-gás	39
2.5.5. Pós-Combustão	41
2.6 Principais Fatores que Afetam a Eficiência Térmica do FEA	44
2.7 Tipos de Carcaça Metálica do FEA	45
2.7.1 Carcaça com Pannel Refrigerado	45
2.8.2 Carcaça Spray	49
2.8.2.1 Design Carcaça Spray	56
2.8.3 Materiais para Construção	57
2.8.3.1 Aço Carbono	57
2.8.3.2 Cobre	58
2.9 Transferência de Calor no FEA	60
2.9.1 Transferência de Calor	60
2.9.2 Transferência por Condução	61
2.9.3 Transferência por Convecção	63

2.9.4 Transferência por Radiação	65
2.9.5 Efeito Combinado de Condução, Convecção e Radiação no FEA.....	67
2.9.6 Deformação Devido a Variação do Ciclo Térmico no FEA.....	68
2.10 Falhas no Pannel Refrigerado.....	69
2.11 Estabilidade Termodinâmica de Óxidos	72
2.12 Difusão em Camadas Oxidas	73
2.13 Equações de Oxidação	75
2.13.1. Equação linear	76
2.13.2 Equação parabólica.....	76
2.13.3 Equação logarítmica.....	77
2.14 Crescimento da Película de Óxido.....	78
2.15 Resistência a Impurezas.....	79
2.16 Impermeabilidade a Componentes Agressivos	80
2.17 Desenvolvimento da Camada de Óxidos na Tecnologia de Altas Temperaturas	81
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	82
3.1 Materiais.....	82
3.1.1 Chapa de Aço ASTM A285C	82
3.1.2 Reagentes.....	84
3.1.3 Amostra de Escória da Carcaça Spray.....	85
3.1.4 Amostra de Aço no forno elétrico a arco.....	85
3.2 Equipamentos.....	86
3.2.1 Desbastes das Amostras	86
3.2.2 Corte da Amostra	87
3.2.3 Lixamento e Polimento	87
3.2.4 Aquisição de imagens.....	88
3.2.5 Espectrômetro Óptico.....	88
3.3 Métodos.....	89
3.3.1 Procedimento de Cortes das Amostras	89
3.3.2 Embutimento a Quente	89
3.3.3 Análise Química.....	90
3.3.4 Análise de Volume Finito	90
4. RESULTADOS.....	91
4.1 Composição Química da chapa metálica da carcaça spray	91

4.2 Análises Metalográfica da chapa metálica da carcaça spray	92
4.3 Discussão de Resultados MEV – EDS	95
4.4 Ensaios de Tração e Microdureza da chapa metálica da carcaça spray	99
4.5 Análise Química do Aço Processado no Forno Fusão	100
4.6 Análise Química da Escória da Carcaça Spray	101
4.7 Análise Qualidade da Água de Resfriamento	101
4.8 Perfil da Temperatura Carcaça Spray	101
4.9 Simulação Numérica por Volume Finito.....	103
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	108
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	109

INTRODUÇÃO

A variação da temperatura no interior do forno elétrico a arco provoca, invariavelmente, o aparecimento de ciclos térmicos que produzem profundas mudanças no painel refrigerado ou carcaça spray como um todo, principalmente na região com menor troca térmica e são de fundamental importância na formação dos vários tipos de microestrutura dela resultantes, que por sua vez têm grande influência sobre as propriedades mecânicas (Konus Icesa, 2007).

As propriedades mecânicas da chapa metálica, como a resistência e a tenacidade, por exemplo, dependem da composição química além do tipo, proporção e granulométrica das fases presentes após o resfriamento e, por sua vez, são controladas pelas características do ciclo térmico. Deste modo, é imprescindível o controle do ciclo térmico que ocorre durante o processo de fusão e refino do aço e após desligamento do forno elétrico a arco para a obtenção de um painel, carcaça spray isentos de trincas e vazamento de água para interior do forno (INCROPERA F, 2008).

A investigação da influencia dos parâmetros do ciclo térmico do forno fusão a arco no painel é fundamental para elucidar as falhas existentes como, deformação e furo da chapa metálica da carcaça spray. Outro aspecto importante que poderá contribuir para ocorrência da falha, furo da chapa metálica, é o aporte repentino de energia/calor advindo dos eletrodos e injetores de oxigênio e gás natural.

A sucata utilizada como matéria prima no processo do forno fusão a arco deve ser estratificação por tipos de metal, densidade, tamanhos e composição química. Com isto, pode-se prever a formação de compostos tais como: sulfeto de ferro, sulfeto de manganês, óxido de ferro, óxido de manganês, sílica, alumina entre outros que podem aderir na chapa refrigerada do forno dificultando o sistema de refrigeração da mesma.

CAPÍTULO 1 – PROPOSTA

Os aços podem ter uma grande variedade de microestruturas dependendo de sua composição química e do processamento (fundido, forjado ou tratado termicamente). Estes aços possuem propriedades dependentes da microestrutura.

A característica microestrutural da ferrita acicular é a mais desejável porque os contornos de grão de alto ângulo e tamanhos de grãos pequenos fazem-na um eficiente bloqueador de propagação de trincas. Ela apresenta-se na microestrutura como grãos em forma acicular, posicionando-se em ângulos uns em relação aos outros. A presença no cordão de solda de elementos de liga como: Mn (BYUN et al., 2003; BYUN et al.; 2003a), Ti (EVANS, 1993; SHIM et al., 2001), Zr (MELLO et al., 2003; MELLO et al., 2003a) e B (EVANS, 1997; EVANS, 1993a; VENTRELLA, 1999), favorece a formação da ferrita acicular e melhora sua tenacidade. A bainita – ferrita com segunda fase, segundo o IIW - é usualmente descrita como tendo duas morfologias com diferenças microestruturais formando a bainita superior e a bainita inferior. A temperatura de transição dútil-frágil da bainita superior é alta porque a fratura por clivagem pode propagar nas lamelas de cementita e os contornos de grão da ferrita, sendo de baixo ângulo, não são eficazes em impedir a fratura. A bainita inferior possui uma fina dispersão de carbonetos que impedem a propagação da fratura, deformando-a plasticamente ao invés de fraturarem-na de maneira frágil. Por este motivo a bainita inferior tem uma temperatura de transição relativamente baixa.

A martensita, por ser um microconstituente de elevada dureza e sua morfologia, mais comumente encontrada, na forma de ripas, sua tenacidade é reduzida. Contudo, se a martensita for revenida, pode precipitar carbonetos com uma fina dispersão que juntamente com uma alta densidade de discordâncias reduz a propagação da fratura.

A abordagem do problema de transferência de calor em painel refrigerado de forno elétrico a arco até bem pouco tempo era feita quase que exclusivamente por métodos analíticos. Estes métodos recorrem a hipóteses simplificadoras no intuito de tornar plausível a abordagem matemática

elementar. Todavia, estas hipóteses podem comprometer o modelamento físico do problema e levar a soluções divergentes do real valor das propriedades desejadas ou a resultados não consistentes fisicamente (ABM, 2006).

Os métodos numéricos, com a disseminação do uso do computador, passaram a ser largamente utilizados e muitas das simplificações empregadas pelos métodos analíticos vieram abaixo. Na atualidade são largamente empregadas as técnicas de Elementos Finitos, Diferenças Finitas e Volumes Finitos.

1.1 Justificativa

Um dos principais fatores de grande interrupção operacional do forno elétrico a arco, de acidente com danos a propriedade e algumas vezes a pessoas é o contato da água de refrigeração da carcaça metálica do forno com o aço líquido. Esta mistura, aço líquido e água podem gerar explosão e projeção de aço líquido há dezenas de metros de distancia, além de danificar os equipamentos e instalações conforme demonstra (figura 1).



Figura 1 – Foto do Forno Elétrico a Arco após explosão devido vazamento de água

A mistura do aço com água se dá pelo vazamento da água de refrigeração da carcaça, normalmente esse vazamento é causado pela sobrecarga térmica oriunda do arco elétrico ou da energia química utilizada no processo do forno. Observa-se na (figura 2) elevação repentina da temperatura

da água em trinta graus célsius em dois minutos, em seguida houve a perfuração da chapa metálica da carcaça spray.

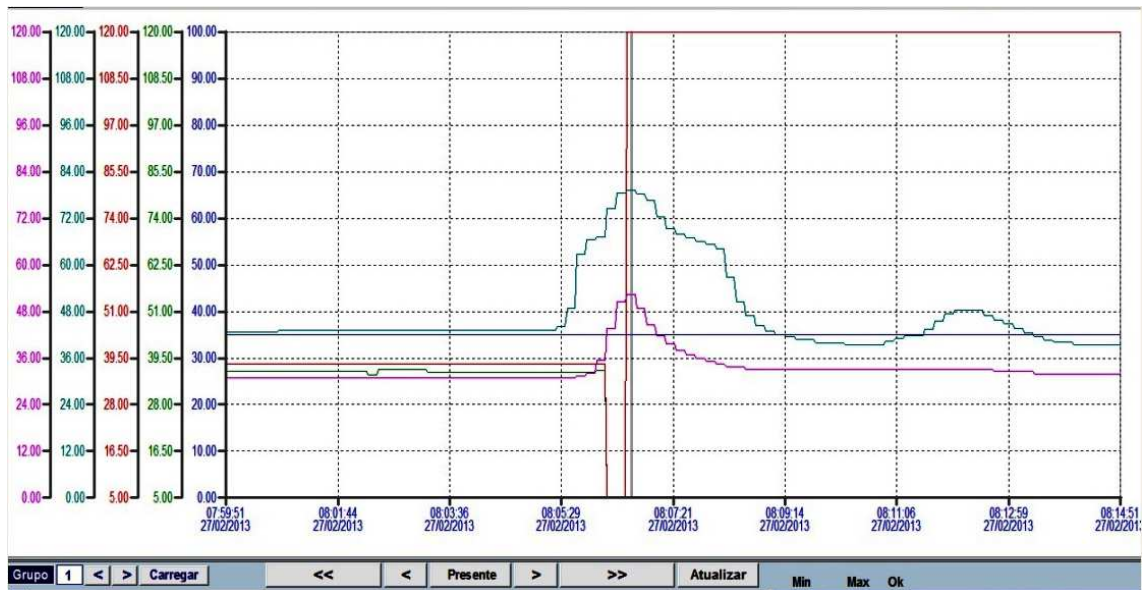


Figura 2 - Gráfico referente ao controle de temperatura do painel refrigerado Forno Fusão a Arco

1.2 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo investigar a influência dos parâmetros do ciclo térmico do Forno Elétrico a Arco na chapa da carcaça spray, no comportamento mecânico e microestrutura do aço. A (figura 3) ilustra parte externa e interna da carcaça spray do forno fusão a arco.

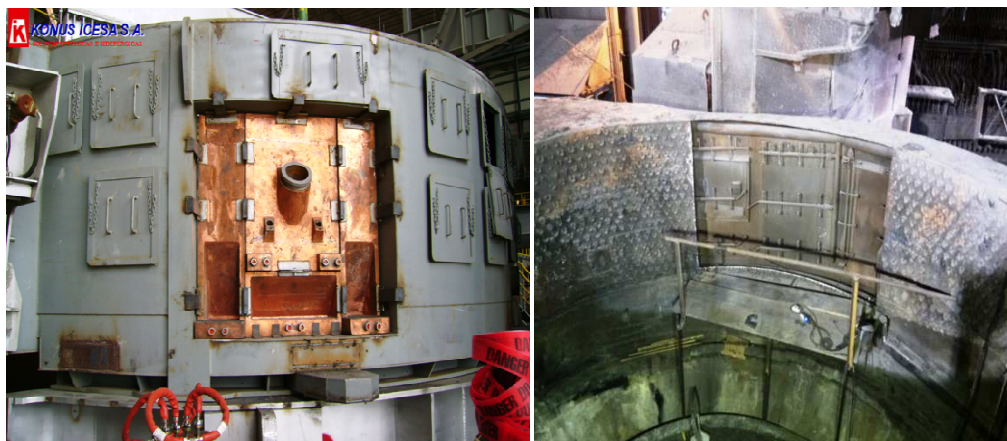


Figura 3 – Foto externa e interna da Carcaça refrigerada (Spray) do Forno Elétrico a Arco

1.3 Objetivos Específicos

Frente as considerações elencadas a abordagem do trabalho estará alicerçada sobre os seguintes aspectos:

- Realizar análise comparativa entre resultados obtidos por meio de procedimento Analíticos e de Volume Finitos.
- Comparar resultados analisados com base em evidências metalúrgicas de amostra de chapas retiradas de regiões mais críticas do forno.
- Desenvolver proposta para reduzir, mitigar o índice de acidente por vazamento de água no interior do forno fusão.
- Analisar a influência da sucata, escória e energias utilizadas no processo do forno na possível no desgaste da chapa da carcaça spray.

1.4 Método de Pesquisa

A pesquisa a ser realizada será de caráter teórico experimental, conforme bibliografia existente com ênfase nos seguintes aspectos:

- Investigação e caracterização das condições de transferência de calor em painel refrigerado de forno elétrico a arco empregando método dos Volumes Finitos na resolução de problemas de fluxo de calor em painel refrigerado de chapas de aço carbono ASTM A285C.
- Análises químicas da chapa e elemento de solda serão feitas para determinar variação da composição em função dos ciclos térmicos bem como da atmosfera oxidante do forno elétrico a arco.
- Avaliação da microestrutura com técnica de microscopia óptica (metalografia). Esta técnica é fundamental para determinar as variações micro estrutural do material analisado: Chapa e Solda.

- Caracterização física por micro dureza será realizado para investigar possível alteração das propriedades mecânicas da chapa de aço.
- A avaliação final da influência do ciclo térmico e atmosfera do FEA no comportamento do material será baseada nas modificações de micro estrutura e propriedades químicas e físicas da Chapa de aço ASTM A285C.

1.5 Estrutura do Trabalho

A dissertação constará de cinco capítulos, sendo que no primeiro, introdução geral, terá a descrição do problema, a justificativa, os objetivos geral, específicos e os métodos de pesquisa. O segundo capítulo destina-se à revisão bibliográfica, que terá o embasamento teórico necessário para o entendimento do processo do forno elétrico a arco e do seu sistema de refrigeração, no qual serão abordados os seguintes assuntos: tipos de carcaças metálicas para forno elétrico, tipos de energias utilizadas e principais fatores que afetam a eficiência energética do forno fusão.

No terceiro capítulo será apresentada a metodologia científica e os materiais utilizados para os procedimentos do modelo proposto para diagnóstico do efeito do ciclo térmico no painel refrigerado do forno fusão. No quarto capítulo será descrita a parte experimental e apresentará os resultados obtidos, bem como a análise e as discussões dos resultados. Por fim o quinto capítulo descreverá as conclusões finais e informações pertinentes ao prosseguimento do trabalho.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico do Forno Elétrico a Arco

A primeira patente de FEA (Forno Elétrico a Arco) foi concedida ao Sr, Willian Siemens em 1878. A primeira planta industrial foi instalada por Paul Héroult nos Estados Unidos em 1907, e todas as plantas até a II Guerra Mundial fabricavam somente aços especiais.

Segundo Figueiras (2007), o processo do FEA iniciou sua expansão na Europa após a II Guerra Mundial, onde havia na época uma grande demanda por aço para a reconstrução, e por outro lado uma grande disponibilidade de sucata gerada durante a guerra. Outro ponto que favoreceu essa expansão foi a menor necessidade de capital investido neste tipo de planta, se comparado as usinas integradas (aciaria elétrica 140 – 200 US\$/t/ano – integradas: 1000 US\$/t/ano). Em 1969, a NUCOR, que atualmente é uma das maiores produtora de aço nos Estados Unidos e a 11ª do mundo, inaugurou a primeira “mini Mill” baseada em forno elétrico a arco. O grande sucesso da NUCOR foi devido a flexibilidade de produtos e a capacidade de atender as demandas regionais de um país de dimensões continentais, além de consumir sucata gerada também regionalmente. A partir de modelo de sucesso, este processo (FEA + mercado local) se expandiu para todo o mundo.

Com a forte demanda mundial de aço e a grande competitividade, a tendência dos fornos é de aumentar sua potência ao máximo, assim como seu máximo peso de vazamento por corrida. Segundo Figueira (2007), o limite de tensão utilizado nos FEAs é de 1200 V, devido a capacidade de isolamento dos condutores. Com este fator limitante, para aumento de produtividade, foram desenvolvidas outras tecnologias, como por exemplo, métodos de injeção de combustíveis pela carcaça para gerar energia química.

Os FEAs com base em suas potências podem ser classificados conforme (figura 4).

Potência específica (kVA/t)	Classificação
< 200	Baixa potência
200 – 400	Média potência
400 – 700	Alta potência
>700	Ultra Alta Potência

Fonte: Operação de Forno Elétrico a Arco, Figueira (2007)

Figura 4 - Classificação dos Fornos Elétricos a Arco

Fonte: ABM Associação Brasileira de Metalurgia

A (figura 5) mostra o panorama mundial de potência do FEAs em relação à capacidade por corrida.

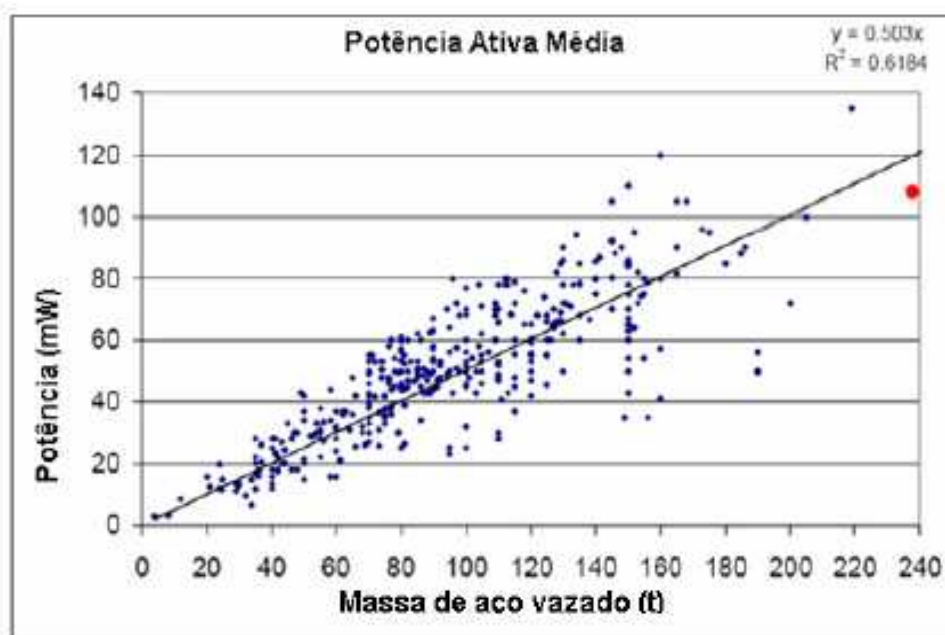


Figura 5 - Potência dos Fornos Elétricos e sua capacidade por corrida

Fonte: EAF Current & Future Terry Wells, (2008).

A (figura 6) mostra a produtividade dos Fornos Elétricos a Arco em nível mundial, relacionando o tamanho da corrida com a produção horária, onde a tendência é de que forno de tamanho maior possua maior capacidade de produção horária, isto se houver potência disponível. A linha vermelha (figura 6) representa o limite de produção característico, limitado pela potência disponível dos fornos.

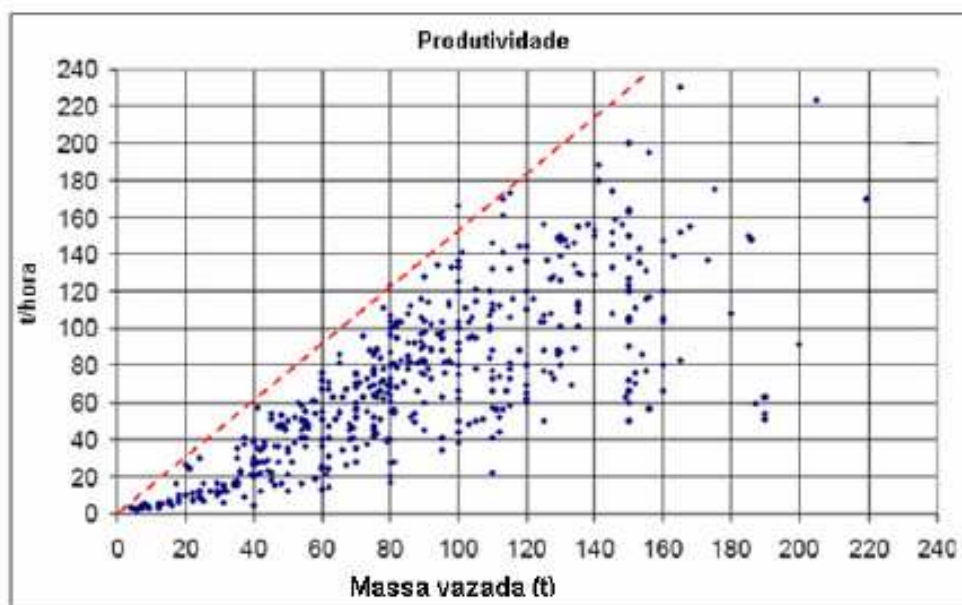


Figura 6 - Produtividade dos Fornos Elétricos a Arco

Fonte: EAF Current & Future Trends, Terry Wells, (2008).

2.2 O Forno Elétrico a Arco

O forno elétrico a arco (figura 7) consiste basicamente de um vaso em formato cilíndrico ou aproximado, podendo ser dividido em quatro partes (Associação Brasileira de Metalurgia, 2007):

Fundo, ou soleira, revestido de refratários até a altura do nível de escória;

- Paredes laterais formadas por painéis refrigerados a água, Topo, ou abóbada, dotado de um movimento pivotante para permitir o carregamento da sucata, formado por um painel refrigerado cujo centro contém uma peça refratária com um ou três furos por onde passam o(s) eletrodo(s);
- Eletrodos, suportados por um conjunto de braços e conectados ao transformador por barramentos de cobre e cabos flexíveis.

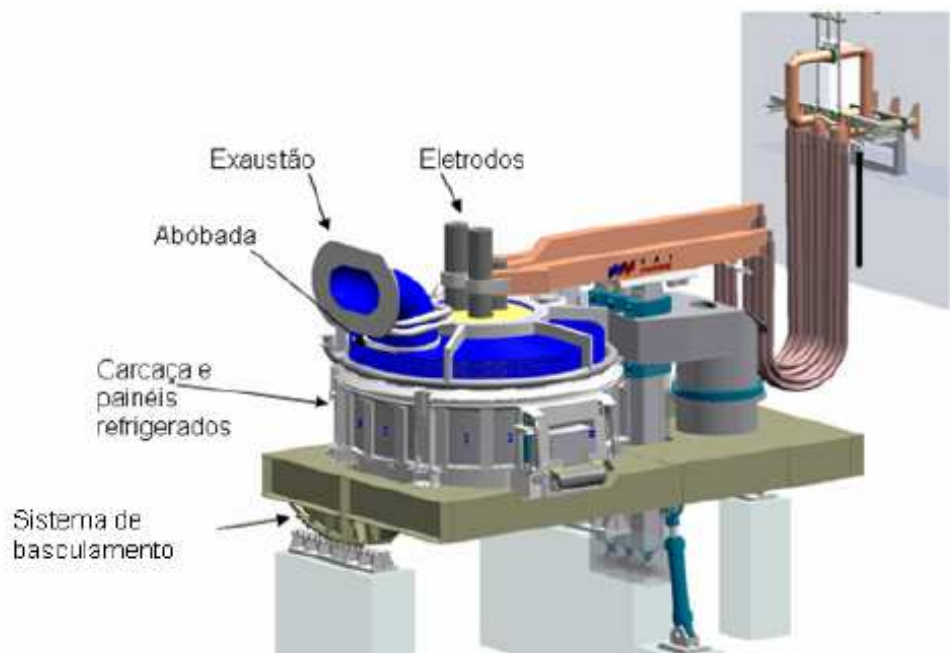


Figura 7 - Representação esquemática do Forno Elétrico a Arco

Fonte: Curso de Aciaria Elétrica Associação Brasileira de Metalurgia (2007).

Tudo isso (soleira, paredes laterais, abóbada e eletrodos), é colocado sobre uma plataforma que permite a inclinação do conjunto durante o vazamento.

A soleira do forno pode ter o formato cilíndrico tendo nas suas laterais duas aberturas: a bica de corrida e porta de escória, dispostas a 180° uma da outra. Nos fornos mais modernos, a soleira tem a forma de um ovo partido longitudinalmente.

Os fornos elétricos podem ser de corrente alternada ou contínua. Um forno elétrico de corrente alternada tem três eletrodos, de seção transversal circular e feitos de grafite. O eletrodo é formado por segmentos variando de 1 a 3 m de comprimento, acoplados entre si por conectores (nipples) rosqueados, à medida que a ponta imersa no forno vai sendo consumida. O arco elétrico é formado entre a ponta do eletrodo e a carga metálica, fechando o circuito elétrico. O aquecimento e fusão da sucata são resultantes do calor gerado pela passagem da corrente elétrica pela carga e, principalmente, pelo calor irradiado pelo arco elétrico, o qual atinge temperaturas da ordem de 4.000 °C (EAF TECHNOLOGY, 2000). As dimensões do arco dependem da tensão e corrente elétrica aplicadas, variando ao longo da corrida. À medida que a sucata vai

sendo fundido, um sistema de regulação automática vai abaixando a coluna de eletrodo, mantendo a distância eletrodo-carga constante e estabilizando a corrente elétrica no nível desejado conforme a etapa do processo.

Algumas plantas mais modernas utilizam o sistema de carcaça dupla: são dois fornos colocados lado a lado com um único transformador acoplado ao sistema dos eletrodos. Quando em um forno tem-se que interromper a corrente elétrica para carregamento de sucata ou vazamento, todo o sistema de eletrodos se move para a outra carcaça e vice-versa. Dessa maneira a taxa de utilização do transformador (maior parte do investimento) é alta.

Um forno elétrico médio, de 80 toneladas de aço de capacidade por corrida, tem transformador de 60.000.000 volt-ampère ou 60 MVA, com a voltagem no secundário variando de 400 a 900 volts e corrente de 45.000 ampères. O tempo de corrida (tap-to-tap) varia de 50 a 60 minutos. Um dos maiores fornos elétricos a arco em operação no mundo tem uma capacidade de 250 t/corrida e potência de 240 MVA. Os fornos elétricos são classificados de acordo com a potência específica (MVA/t de capacidade) como mostra a (figura 8) a seguir.

Potencia Especifica (KVA/t)	Classificação
<200	Baixa Potencia
200 - 400	Média Potencia
400 - 700	Alta Potencia
>700	Ultra Alta Potencia (UHP)

Figura 8 - Classificação dos fornos elétricos a arco

Fonte: ABM - Associação Brasileira de Metalurgia

Para se fundir uma tonelada de sucata no FEA e vaziar o aço a 1620 °C são consumidos cerca de 440 kWh de energia, comparada com o valor teórico de 300 kWh. Por essa razão o principal item do custo de transformação no processo é energia elétrica.

2.3 Característica e Evolução do Forno Elétrico a Arco

Apesar do elevado consumo de energia elétrica, o consumo global de energia (até o produto final) no processo elétrico é cerca de 60% do consumo no processo LD (Linz-Donawitz) que tem como fonte de energia o oxigênio. Essa diferença se deve, principalmente, ao processo de reciclagem. Aço é um dos materiais mais reciclados no mundo e o forno elétrico a arco, pela sua capacidade de operar com 100% de carga sólida, é o processo mais utilizado para reciclá-lo (EAF TECHNOLOGY, 2000). As sucatas de aço variam amplamente em termos de composição e geometria. Esses dois fatores como será visto, são fundamentais para o processo, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. A fusão desses materiais no forno elétrico permite obter um novo produto, com nova composição e geometria, mais adequadas à sua nova aplicação, a partir de materiais que, de outra maneira, seriam imprestáveis economicamente ou de baixo valor. Assim, o processo tem grande impacto do ponto de vista ambiental (evitando a dispersão de materiais imprestáveis no ambiente e extração de matérias primas da natureza) e econômico.

A expansão das aciarias elétricas ocorreu principalmente na Europa, com a criação de novas siderúrgicas de pequeno porte para concorrer com grandes empresas americanas, como a Bethlehem Steel e US Steel (usinas integradas), na produção de produtos longos a baixo custo (FIGUEIRAS, 2007).

Nucor inaugura nos EUA a primeira “mini steel” baseada em forno elétrico, voltada para produtos longos, modelo que foi seguido rapidamente por outras empresas. Esse padrão (FEA + mercado local) foi, posteriormente, seguido por outras empresas em todo mundo.

Na década de 70-80 restrições ambientais e elevado custo de mão de obra, principalmente na Europa, obrigaram diversas empresas baseadas no processo LD a fecharem suas coqueiras e alto-fornos, substituindo-os por fornos elétricos em aciarias de maior capacidade, algumas com mais de 1 Mt/ano.

Até então, o processo elétrico se limitava à produção de produtos longos, para os quais as menores restrições de qualidade permitem a utilização

de sucata contendo impurezas como Cu, e Sn. Assim, o mercado de produtos planos, os quais requerem elevados níveis de pureza do aço, somente obtidos com a utilização de ferro primário (gusa), sem contaminantes, concentrou-se nas mãos de empresas baseadas no processo LD. Em 1987, a Nucor decidiu entrar no mercado de planos produzindo chapas finas, para aplicações de menores exigências, diretamente a partir do lingotamento contínuo utilizando sucata, iniciando assim a produção de planos via processo elétrico.

Desse modo, a utilização do forno elétrico cresceu a ponto de atingir 39% da produção mundial em 2002. Hoje, o FEA representa 33% dessa produção, ou 400 Mt/ano. Essa menor participação percentual do processo elétrico é função do crescimento da produção chinesa baseada no LD.

2.4 Operação do Forno Elétrico a Arco

A operação do forno elétrico pode ser dividida em Quatro etapas: carregamento, fusão, refino (ou oxidação) e vazamento. Uma descrição mais detalhada de cada uma delas a seguir:

Carregamento: a sucata previamente preparada (limpeza e corte) é colocada em baias próximas ao forno, separadas de acordo com o tipo e composição. Alguns fornos utilizam, além da sucata, pré-reduzidos (DRI) ou gusa líquido, o qual é transportado diretamente do alto-forno. A sucata, a partir das baias, é colocada em cestões por meio de pontes rolantes equipadas com eletroímãs as quais são, posteriormente, transportados até as proximidades do forno. Uma ponte rolante eleva o cestão de sucata sobre o forno, ao mesmo tempo em que a abóbada é deslocada lateralmente. O operador da ponte rolante posiciona o cestão sobre o forno, baixando-a parcialmente dentro do mesmo. Nesse momento, um cilindro hidráulico movimenta lateralmente o fundo bipartido, abrindo-o e despejando a sucata dentro do forno. Devido à baixa densidade da sucata, comparada com a do aço líquido, são necessárias dois ou mais cestões para se produzir aço suficiente para uma corrida. Em alguns fornos, dotados de sistemas de preaquecimento de sucata, a carga pode ser feita através de correias transportadoras posicionadas dentro de um

túnel onde ela é aquecida pela combustão dos gases gerados na corrida anterior. Outros sistemas utilizam um aquecedor colocado acima do forno por onde circulam os gases quentes.

Os fornos que utilizam gusa líquido podem ter uma bica lateral para o carregamento. O carregamento é uma das mais perigosas operações no forno elétrico. A sucata ao ser descarregada no forno desloca para cima qualquer metal líquido contido na soleira. Graxa e pós contidos na sucata, quando carregados no forno quente, entram em ignição resultando em erupções de chamas pelas portas e no topo. Após o carregamento, a abóbada volta para sua posição original, fechando o forno.

2.4.1 Fusão da Carga Metálica

A fusão se inicia após o abaixamento dos eletrodos dentro da sucata quando se dá a ignição do arco. Após a ignição, utilizando-se uma potência mais baixa, os eletrodos vão gradativamente penetrando o leito de sucata e o metal líquido vai se acumulando no fundo do forno. Após um período inicial de fusão a baixa potência, quando os eletrodos já penetraram na sucata por cerca de 30 a 50 cm, a potência é elevada até a completa fusão da carga. Nesse momento desliga-se o transformador, elevam-se os eletrodos e abre-se novamente a abóbada para outro carregamento. Para acelerar a fusão injeta-se oxigênio para corte da sucata e oxidação de parte do ferro, gerando mais calor. Oxigênio também pode ser injetado no metal líquido acumulado no fundo do forno para oxidação do carbono como fonte adicional de calor. Maçaricos oxí-óleo ou oxí-gás, colocados nas paredes laterais, são também utilizados como fontes térmicas para fusão da sucata, principalmente daquela localizada entre eletrodos. Durante a fusão inicia-se a formação de escória. A escória é formada a partir da oxidação das impurezas e de aditivos colocados na carga como fundentes (cal e dolomita) ou injetados durante a fusão. Essa escória terá um importante papel na etapa seguinte de refino.

A escória do forno elétrico participa ativamente do processo de refino oxidante e representa um verdadeiro “raios-x” de como está o comportamento do forno ao longo da corrida. Sua importância é tanta que durante toda a

corrida os operadores do forno a observam, e ao notar alguma alteração, fazem análises químicas para certificarem se está tudo transcorrendo conforme o esperado.

A escória da aciaria trata-se de uma mistura de óxidos que apresenta CaO , SiO_2 , FeO , MnO , MgO , Al_2O_3 , P_2O_5 como principais constituintes. As impurezas da carga contribuem com a SiO_2 (sílica) e Al_2O_3 (alumina). Cal calcítica (CaO) e dolomítica (CaO-MgO) são adicionadas ao processo de forma a neutralizar a sílica e assim proteger o refratário, e criar uma pequena quantidade de fase sólida (MgO saturado) que irá auxiliar o processo de espumação. Óxidos originários do processo de refino oxidante da carga (MnO , FeO , SiO_2 , P_2O_5); óxidos gerados do desgaste dos refratários, principalmente o MgO . Na escória ainda há a presença de FeO oriundo da sucata carregada no forno e Ferro Metálico que foi misturado à escória por diversas razões que mais adiante serão explicadas.

Composição típica (componentes mais importantes, %massa):

FeO 20-50%

MnO 3-6%

CaO 20-40%

SiO_2 10-20%

MgO 7-14%

P_2O_5 1-2%

Cr_2O_3 1-2%

Al_2O_3 2-10%

2.4.2 Refino ou Oxidação do Aço

Após a fusão do último cestão, com a sucata totalmente fundida e o banho plano, inicia-se o refino. Nessa etapa, injeta-se oxigênio no banho para promover a oxidação do silício, manganês, e principalmente fósforo, É nessa etapa também que se ajusta a temperatura do aço líquido para o vazamento. Elementos com baixa afinidade pelo oxigênio, como Ni e Cu , não podem ser removidos pelo refino e seus teores devem ser controlados através da seleção da sucata ou carregamento de gusa ou pré-reduzido. O término da etapa de

refino é determinado por meio de análise química de amostras retiradas do banho e medidas de temperatura.

2.4.3 Vazamento do Aço Líquido

Uma vez que a temperatura e composição química estão corretas, o aço é vazado em uma panela pré-aquecida inclinando-se o forno. Nos fornos mais antigos, o aço é vazado através de um canal de vazamento horizontal localizado a 180º graus da posição da porta de escória. Esse canal pode estar localizado acima do nível de escória, e nesse caso se requer uma grande inclinação para o vazamento, ou submerso. Nos canais submersos, no momento do vazamento a massa de tamponamento é retirada para permitir o escoamento do aço. Nos canais submersos a passagem de escória para a panela é menor, mas o tempo de vazamento é mais longo. Os fornos mais modernos são dotados de um sistema de vazamento excêntrico (EBT – Eccentric Bottom Tapping) que consiste em um furo vertical localizado excentricamente em um dos lados do forno (DANIELI, 2008). Esse sistema, além de permitir um maior controle da passagem de escória para a panela, pelo fato do jato de aço ser mais fechado, reduz a absorção de nitrogênio e hidrogênio durante o vazamento. O controle do fluxo de aço é feito através de uma válvula gaveta que controla a abertura do furo. Durante o vazamento, desoxidantes e algumas ligas são adicionadas no jato de aço para aproveitar o efeito de turbulência. Ao término do vazamento, em algumas aciarias, parte do aço líquido é deixada no forno para formar o chamado “fundo úmido” para acelerar a fusão da sucata e o refino na próxima corrida.

2.5 Tipos de Energias Utilizadas no FEA

A (figura 9) relaciona a energia teórica necessária para aquecer o aço de 25°C a 1650°C, considerando sua fusão e sobreaquecimento. Os valores podem sofrer pequenas alterações, dependendo das aproximações dos cálculos termodinâmicos adotados.

Aço	Entalpias kWh/t			
25°C à 1650°C	Aquecimento (calor sensível)	Fusão (calor latente)	Sobreaquecimento	Total
	285	57	43	385

Figura 9 - Energia teórica necessária para fusão e sobreaquecimento do aço a 1650 oC.

Isso significa que o valor teórico para a fusão e sobreaquecimento até 1650 °C de 1t de aço é de 385 kWh.

No entanto, cálculos teóricos e valores práticos mostram que os FEAs possuem uma eficiência entre 55 - 65% na maioria das operações modernas. Isso resulta em uma energia total entre 590 a 700 kWh/t (Pittsburg, 1996).

A energia total é um indicativo para avaliar a distribuição entre a energia elétrica e química, e seu resultado na eficiência térmica.

Basicamente as fontes de energia, em FEAs modernos, são de origem elétrica (60 - 65%) e química (35 - 45%).

Então coexistem nos FEAs (forno elétrico a arco) o uso de energia elétrica e energia química. Pode-se estabelecer um balanço energético para avaliar a contribuição das diversas práticas e as perdas do processo.

Para estabelecer um balanço energético, é necessário reunir um grupo grande de informações, dependendo do nível de detalhamento desejado para o balanço. A (figura 10) mostra as variáveis que podem ser consideradas em um balanço energético.

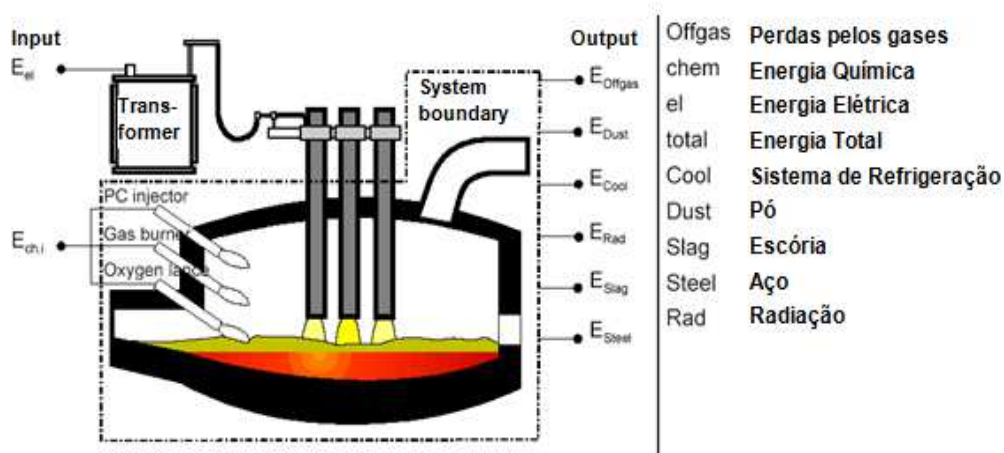


Figura 10 – Sistema de Entrada e Saída de energia no Forno Elétrico a Arco.

A execução de um balanço energético é imprescindível para a compreensão da operação de um FEA. Um balanço energético permite:

- Reunir todos os subsistemas, como por exemplo: arco elétrico e aço; aço e refratário;
- Analisar o impacto de cada subsistema no balanço geral;
- Comparar as energias reais envolvidas no processo - inputs e perdas - em uma única unidade, usualmente - kWh/t - em bases da carga e adições utilizadas.

A seguir, é apresentado um balanço genérico para um FEA.

<p>Energia Entregue 700 kWh/t</p>		<p>→ Reações químicas 315 kWh/t – 45%</p> <p>→ Energia elétrica 385 kWh/t – 55%</p>
<p>Energia para o aço 385 kWh/t 55%</p>	<p>Perdas 315 kWh/t 45%</p>	<p>→ Saída de gases 140 kWh/t – 20%</p> <p>→ Escória 60,2 kWh/t – 8,6%</p> <p>→ Refrigeração 79,8 kWh/t – 11,4%</p> <p>→ Perdas elétricas 19,95 kWh/t – 2,85%</p> <p>→ Outras perdas 15,05 kWh/t – 2,15%</p>

Eficiência térmica = $385 / 700 \sim 55\%$

- As perdas de energia devido à saída de gases e a refrigeração tendem a aumentar pelo incremento de energia química no FEA.
- O balanço térmico deve ser individualizado para cada forno, devendo-se atingir um equilíbrio entre a energia química e a energia elétrica. O indicador mais consistente torna-se a energia total sobre a tonelagem de aço vazada.
- As perdas de energia devido à saída de gases, refrigeração e perdas elétricas dependem do tempo de processo.
- Pode-se observar que a eficiência térmica de um FEA ainda é muito baixa, isto significa que muito trabalho ainda precisa ser feito para

melhorá-la.

- A redução de perdas é uma atividade que permite obter custos mais baixos.
- A energia entregue é sempre referida à quantidade de aço vazada. Logo, deve-se vaziar o máximo de aço possível, para que a energia entregue, dividida pela tonelagem, seja a menor possível.

2.5.1 Energia Elétrica

De acordo com o estudo realizado pelo IISI no ano 2000, as potências aparentes tiveram um substancial aumento ao longo dos últimos 20 anos, de cerca de 30%. Isso se deve aos avanços na área elétrica, particularmente nos sistemas secundários. Assim, o estado da arte atual indica fornos com potência aparente de até 1000 kVA/t (EAF TECHNOLOGY, 2000).

O fato comum em todos os FEAs é que o arco elétrico é o responsável pela transferência da energia elétrica para a carga, que é o objeto do processo.

O arco é uma descarga elétrica na mistura de gases e vapores metálicos, em forma de plasma, que compõe a atmosfera do forno. Este plasma é formado entre a ponta do eletrodo e a carga metálica (no estado sólido ou líquido) no FEA (BOWMAN, B. 2009). Os pólos positivo e negativo trocam de posição a cada meio ciclo de tensão da rede. Cerca de 95% da potência disponível é dissipada pelo arco. A transferência da energia é feita por irradiação, aí residindo um dos pontos principais a serem observados durante a operação no FEA. Para que a transferência seja otimizada é necessário que o arco esteja coberto. Esta cobertura tanto pode ser pela carga metálica quanto pela escória formada no refino. A temperatura do arco é da ordem de 10.000 a 15.000°C e a concentração de energia é tal que corresponde a cerca de 30 kW/cm³. A concentração maior de energia ocorre nos pontos quentes, nos pólos positivo e negativo e o restante permanece constante. O diâmetro do arco depende basicamente da corrente utilizada, sendo normalmente de 10 a 20 cm (BOWMAN, B. 2009). O comprimento do arco depende basicamente da tensão de arco, sendo calculado:

$$L_{arc} = \frac{V_{arc} - 40}{10...12} cm \quad (Eq.1)$$

Como se vê, essa relação é independente da intensidade da corrente de arco. O valor de 40 V foi obtido através de cálculos teóricos, pois é impossível medir a queda de tensão nos pontos quentes.

Os valores de 10 a 12 correspondem a uma queda de tensão de 10 a 12 V/cm no arco. A (figura 11) mostra um perfil do arco elétrico.

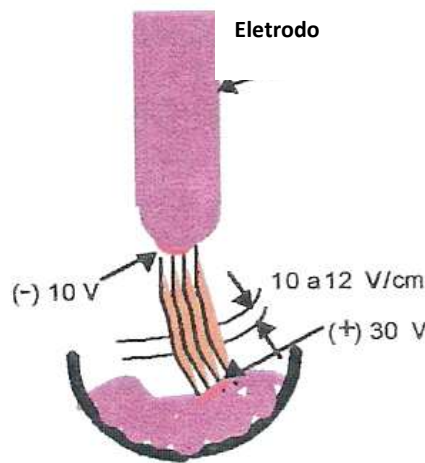


Figura 11 - Perfil do arco elétrico na ponta do eletrodo do forno fusão a arco

A estabilidade do arco, durante o período de fusão, depende da movimentação (queda) da sucata no interior do FEA. E durante o período de refino, depende da escória espumante.

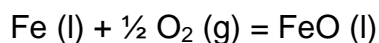
A transferência de energia elétrica da subestação até a formação do arco apresenta eficiências médias de 90 a 95%. Essas perdas ocorrem nas linhas de transmissão e conectores, transformadores, barramento secundário, eletrodos, etc (INCROPERA F. 2008).

A transferência de energia do arco para a carga depende da etapa do processo; fusão ou refino, as quais dependem da superfície metálica exposta e das características da escória espumante. A etapa de fusão pode ser dividida em: início de perfuração, perfuração na qual o eletrodo está coberto por sucata e final de fusão. A eficiência na etapa de fusão varia de 88 a 92%, em função do quanto o eletrodo está coberto pela carga. As fases de menor eficiência são

o início de perfuração e o final de fusão. No refino, em função das características da escoria espumante, a eficiência varia de 36 a 93%. Dessa forma, a eficiência elétrica total média varia de 60 a 80%.

2.5.2 Energia Química

A injeção de oxigênio em FEAs resulta inicialmente na oxidação do ferro, que é o elemento predominante na carga, formando FeO. Consumo média de oxigênio durante a corrida no forno pode variar entre 20 e 35 m³/t. A reação de formação de FeO pode ser expressa como segue:

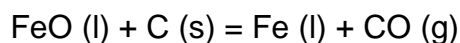


A variação de entalpia de formação de FeO é de $\Delta H = - 5,68$ kWh/Nm³O₂.

Sendo uma reação fortemente exotérmica.

Este valor de entalpia pode ser encontrado em diversas literaturas, apresentando pequenas variações, frutos do método de cálculo e aproximações utilizados. As reações são consideradas na temperatura do aço líquido, entre 1537 e 1700 °C, dependendo da fonte consultada. Valores mais ajustados, para uma dada temperatura, precisam ser obtidos caso a caso por cálculos termodinâmicos.

O carbono existente na carga ou adicionado provoca a redução do FeO formado, cuja reação é dada a seguir:



A variação de entalpia de formação de CO é de $\Delta H = + 4,23$ kWh/Nm³O₂

A soma das reações (1 e 2) acima apresenta um saldo de entalpia de:

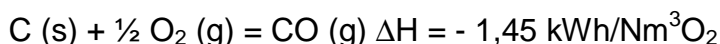
$$\Delta H = - 1,45 \text{ kWh/Nm}^3\text{O}_2$$

Isto significa um ganho energético, mesmo que todo o FeO gerado durante a fase de injeção de oxigênio seja reduzido pelo carbono.

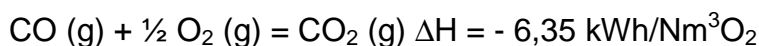
Na prática, é necessária a formação de uma escória com níveis

controlados em FeO. Essa escória é usada na desfosforação do aço líquido e obtenção de uma boa escória espumante. Isto significa que nem todo o FeO formado deve ser reduzido pelo carbono, implicando na obtenção de entalpias maiores do que a anteriormente mencionada.

A reação resultante da oxidação do ferro (reação 1) e redução do óxido pelo carbono (reação 2) será:

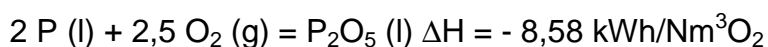
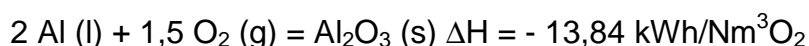
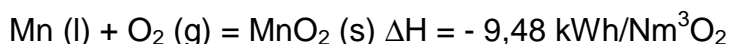
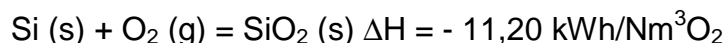


Estequiometricamente significa que 1 kg de C reage com 0,93 m³ de O₂ e gera 1,9 m³ de CO. Esse grande volume de CO será aproveitado parcialmente na pós-combustão:



Também pode ocorrer a reação direta entre o carbono (dissolvido e/ou presente na carga) e o oxigênio injetado:

O oxigênio também reage com os demais componentes da carga metálica, como o Si, Mn, Al, P...



Existem três formas de se injetar oxigênio nos FEAs:

- Lanças consumíveis;
- Lanças refrigeradas;
- Injetoras.

Lanças Consumíveis

Vantagens:

- Pode ser posicionada para as zonas mais quentes do forno favorecendo as reações de oxidação;
- Não existe água envolvida no procedimento;
- A porta de escória pode ser parcialmente fechada.

Desvantagens:

- Difícil de operar; exigindo constantes manipulações para alterar a posição da ponta da lança e substituição da mesma;
- Consumo de oxigênio alto, baixa eficiência;
- Consumo de refratário maior na porta do forno;
- Alto custo de reposição;
- Pouco controle de FeO na escória; frequentes valores altos.

Lanças Refrigeradas

Vantagens:

- Menor custo operacional, comparado as lanças consumíveis;
- Pouca manipulação.

Desvantagens:

- Projeções de aço e escória;
- Risco de vazamento de água no interior do FEA;
- Difícil de penetrar na carga, sendo necessário o uso de queimadores.

Injetoras de oxigênio

Vantagens:

- Porta do forno fechada;
- Distribuição mais uniforme do oxigênio;
- Torna a operação mais robusta;
- Menores custos totais;
- Automatização do controle da injeção simultânea de oxigênio e carbono, em função do tipo de injetora;
- Segurança.

Desvantagens:

- Alto potencial para danos em refratários;
- Possibilidades de projeção de aço e escória;
- Requer pressões e vazões de oxigênio extremamente controladas;
- Variação do local de incidência do jato com o desgaste progressivo do refratário do forno.

O fator de eficiência da injeção de oxigênio via lanças consumíveis é muito variável. Para injetores de oxigênio, que possuem menor variação, pode-se adotar o valor médio de 74%. Os principais elementos da carga que reagem com o oxigênio, à exceção do ferro, são o carbono e o silício. Pode-se usar então um valor médio de entalpia na queima desses elementos de $\Delta H = - 5,20$ kWh/m³ O₂. Na prática, a determinação precisa deste valor é difícil, considerando a heterogeneidade da composição química e da temperatura do banho (Pittsburg, 1996).

<p>A energia química real será de:</p> $0,74 \times 5,2 \text{ kWh/Nm}^3 \text{ O}_2 = 3,84 \text{ kWh/Nm}^3 \text{ O}_2$

Considerando que estamos substituindo a energia elétrica empregada pela energia química de diversas fontes, tem-se então:

$$\text{energia elétrica} = \text{energia química}$$

Adotando-se agora que a energia química é proveniente da injeção de oxigênio, e levando-se em conta as eficiências da energia elétrica e química,

$$\text{tem-se: } n_{el} \times n_{arc} \times \Delta e_{el} = n_i \times \Delta h_i$$

onde:

$n_{el} \times n_{arc}$ = produto da eficiência do circuito elétrico e transferência de energia do arco para a carga.

Δe_{el} = energia elétrica teórica substituída.

n_i = eficiência da energia química obtida pela injeção de oxigênio.

Δh_i = entalpia média obtida pela injeção de oxigênio.

Substituindo-se na equação acima e adotando-se $n_{el} \times n_{arc} = 70\%$

tem-se:

$$0,70 \times \Delta e_{el} = 3,84 \text{ kWh/Nm}^3 \text{ O}_2$$

$$\Delta e_{el} = 5,49 \text{ kWh/Nm}^3 \text{ O}_2$$

Para as eficiências adotadas, 5,2 kWh/Nm³ O₂ de energia química teórica substitui 5,49 kWh/Nm³ O₂ de energia elétrica teórica.

A obtenção desses valores é importante na avaliação de custos de utilização da energia elétrica e química.

2.5.4 Queimadores Oxi-gás

Os queimadores (figura 12) devem ser montados nos pontos frios do forno, para que o mesmo fique termicamente balanceado. Os locais e o número exato dependem das características de cada forno. Podem ser de três a oito e situar-se a 500 - 600 mm acima do banho, com uma inclinação de 15 – 25°. A transmissão de calor se dá por radiação da chama e convecção forçada dos fumos formados na combustão do combustível pelo oxigênio.

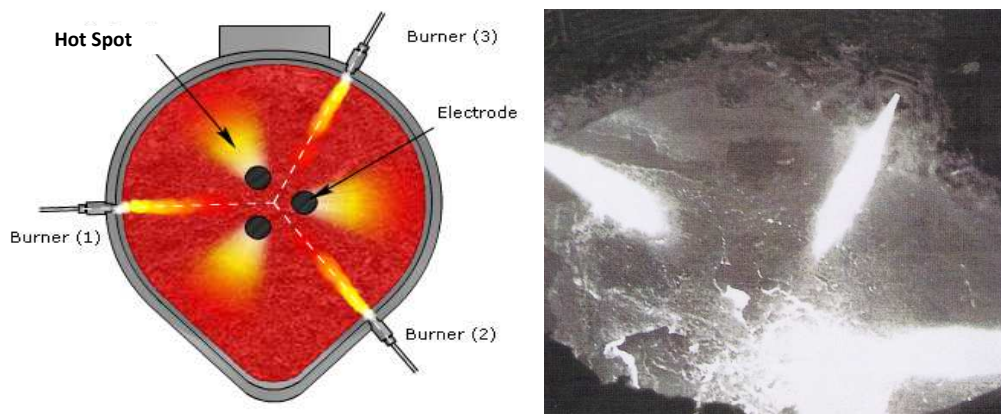


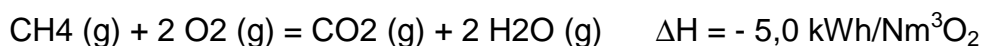
Figura 12 - Posicionamento dos queimadores e visão das chamas proporcionadas.

Os queimadores podem utilizar diferentes combustíveis em conjunto com o oxigênio, para atingir a temperatura de chama. A (figura 13) mostra o poder calorífico de diferentes combustíveis.

	kWh/Nm ³ do elemento	kWh/Nm ³ de O ₂
Gás natural	10,0	5,0
Óleo leve/Diesel/Querosene	11,5	5,0

Figura 13 - Poder calorífico de diferentes combustíveis

A reação de combustão do gás natural pelo oxigênio pode ser expressa da seguinte forma:



Alguns cuidados devem ser considerados no uso de queimadores oxi-gás:

- Aumento do nível de ruído na plataforma do forno;
- Chamas bloqueadas por sucata pesada;

Saída de chamas imprevistas pelas aberturas do forno devido à posição relativa da sucata.

A eficiência da transferência de energia dos queimadores varia com a etapa de fusão. Os queimadores serão mais eficientes no início da fusão da carga, onde estarão completamente cobertos pela carga metálica em baixa temperatura.

Pode-se estimar o efeito da substituição da energia elétrica pela energia gerada pelos queimadores oxi-gás, adotando-se o fator de eficiência total dos queimadores entre 50 e 60%, e os fatores de eficiência elétrica e do arco entre 60 e 80%. Esta substituição, considerando-se os mínimos e máximos de eficiência, pode ser assim computada:

$$\Delta e_{\text{el,G}} = \frac{50 \cdot (10,0)}{80} = 6,25 \text{ kWh/Nm}^3 \text{ gás}$$

$$\Delta e_{\text{el,G}} = \frac{60 \cdot (10,0)}{60} = 10,0 \text{ kWh/Nm}^3 \text{ gás}$$

Adotando-se maiores eficiências para o arco e os queimadores logo após o início da fusão, a eficiência do gás entre 75 a 85% e a eficiência do arco entre 85 e 95% esses valores são alterados para:

$$\Delta e_{\text{el,G}} = \frac{75 \cdot (10,0)}{95} = 7,9 \text{ kWh/Nm}^3 \text{ gás}$$

$$\Delta e_{\text{el,G}} = \frac{85 \cdot (10,0)}{85} = 10,0 \text{ kWh/Nm}^3 \text{ gás}$$

O que é compatível com o valor adotado médio de 8,0 kWh/Nm³ gás.

A (figura 14) mostra a eficiência dos queimadores ao longo do processo de fusão da carga.

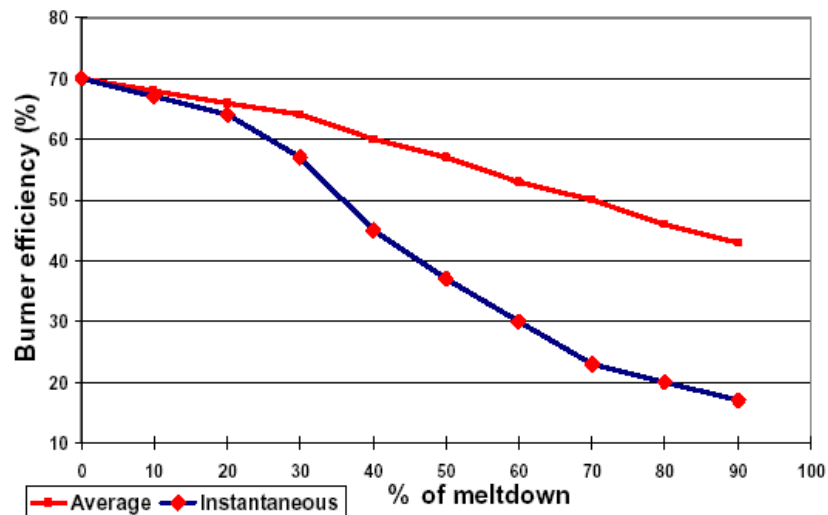


Figura 14 - Eficiência dos queimadores oxigás do forno fusão

2.5.5. Pós-Combustão

É um processo para utilização da energia química contida nos gases gerados durante a fabricação de aço no FEA. Consiste na combustão de CO e H₂ provenientes do banho metálico. Fontes de CO e H₂ no FEA são relacionadas abaixo (Pittsburg, 1996).

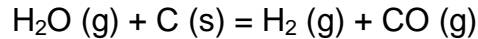
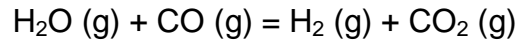
Origens do CO

- Combustão dos hidrocarbonetos presentes na sucata durante a fusão;
- Combustão dos hidrocarbonetos nos queimadores oxigás;
- Oxidação parcial do carbono durante a injeção de oxigênio;
- Redução do FeO durante a formação de escória espumante.

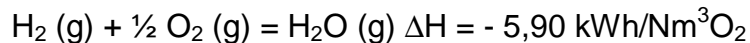
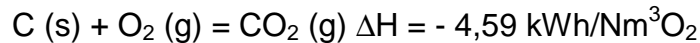
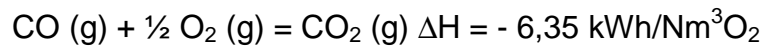
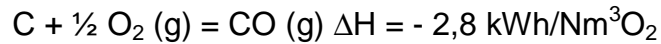
Origens do H₂

- Craqueamento dos hidrocarbonetos presentes na sucata;

- Redução de água da atmosfera e carga.



Seguem as reações de oxidação do carbono e H₂:



Admitindo que o gás gerado possui, por exemplo, uma composição de 25% CO e 10% H₂, pode-se calcular a entalpia de reação baseado nos valores acima mencionados.

$$\Delta H_{\text{PC}} = \frac{25.(6,35)}{35} + \frac{10.(5,90)}{35} = \frac{158,75}{35} + \frac{59,00}{35} = 6,22 \text{ kWh/Nm}^3 \text{O}_2$$

Como a pós-combustão é efetuada acima da pilha de sucata e do metal líquido coberto com escória, a transferência de energia do gás para a sucata e banho é abaixo de 50%. A eficiência térmica máxima é estimada em 55%, quando existe sucata sólida presente e 20 a 30% nos casos de escória espumante.

Pode-se estimar o efeito da substituição da energia elétrica pela energia gerada na pós-combustão adotando-se o fator de eficiência total entre 30 e 50%, e os fatores de eficiência elétrica e do arco entre 60 e 80%.

Esta substituição pode ser assim computada:

$$e_{\text{el,PC}} = \frac{30.(6,8)}{80} = 2,55 \text{ kWh/Nm}^3 \text{O}_2$$

$$\Delta e_{\text{el,PC}} = \frac{50.(6,8)}{60} = 5,67 \text{ kWh/Nm}^3 \text{O}_2$$

Os valores reportados de substituição de energia elétrica por pós-combustão dos gases de saída são, no máximo, em torno de 3,1 kWh/Nm³ O₂, o que é coerente com os valores de eficiência adotados.

As (figuras 15 e 16) representa o sentido dos injetores de pós-combustão, tendo em vista que os gases gerados na atmosfera do forno tendem seguir a direção do arco elétrico.

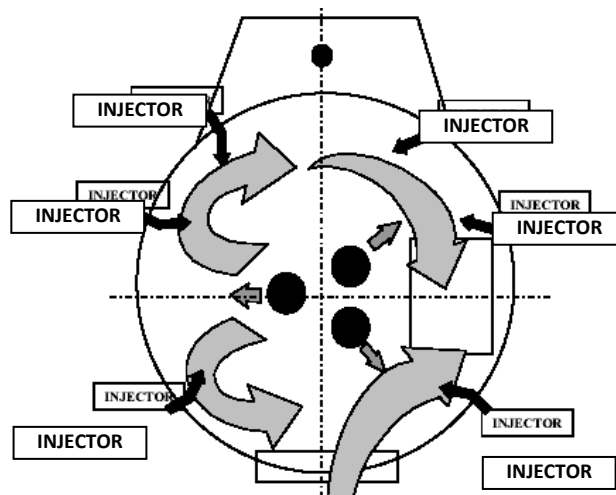


Figura 15 - Posição dos injetores PC em contra fluxo aos gases gerados no FEA

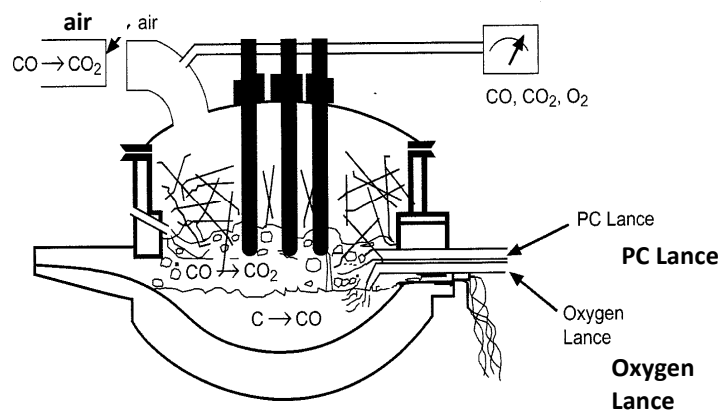


Figura 16 - Visão do forno em fusão com utilização de pós combustão

Segue (figura 17) o quadro resumo das energias fornecidas em FEAs.

Energias Fornecidas		
Fonte de energia	Fator de eficiência %	Equivalente energético kWh / Nm ³ O ₂
Energia elétrica	60 a 80	-
Injetores de oxigênio	70 a 80	4,5
Queimadores oxi-gás	50 a 60	8,0
Pós-combustão dos gases	30 a 50	3,1
Total do FEA	50 a 67	-

Figura 17 - Fatores de eficiência e equivalentes energéticos.

2.6 Principais Fatores que Afetam a Eficiência Térmica do FEA

A (figura 18) relaciona um conjunto de fatores que afetam a eficiência térmica nos FEAs. São valores médios, servindo como referência da ordem de grandeza. Valores mais acurados devem ser estudados caso a caso. O efeito desses fatores normalmente não aparece com clareza nos balanços térmicos. Da tabela 7, podem-se observar os grandes efeitos de dois itens em particular: o rendimento da carga metálica e o tempo de forno parado.

No rendimento da carga, deve-se considerar o ferro contido e a energia gasta adicional para aquecer impurezas e residuais que não se incorporam ao aço. Por isso que o ideal seria uma carga de ferro metálico.

Outro ponto é o Power Off, que incide diretamente nas perdas térmicas do FEA.

Fator	Relação	Efeito potencial no aumento do consumo de energia em kWh / t aço
Rendimento da sucata	Para cada 1% de redução	10
Adição de escória	Para cada 10 kg / t de sucata	16
Número de cestas	Por cesta	10
Temperatura de vazamento	Por cada 10°C acima de 1600°C	7

Interrupções durante a fusão	Por cada 10 min	4
Interrupções durante o refino	Por cada 10 min	17
Interrupções menores do que 30 min	Por cada 10 min	5
Interrupções maiores do que 30 min	Por cada 10 min	3

Figura 18 - Fatores que afetam a eficiência térmica dos FEAs

2.7 Tipos de Carcaça Metálica do FEA

2.7.1 Carcaça com Painel Refrigerado

Em 1974 foi instalado o primeiro painel refrigerado em um FEA na empresa BSW – Alemanha demonstrada na (figura 19), graças à insistência do inventor Gerard Fuchs e do gerente de produção apesar da discordância da área técnica da empresa.

Meses depois foi instalado um conjunto completo na empresa HSW também na Alemanha e desta vez incluindo a abóbada

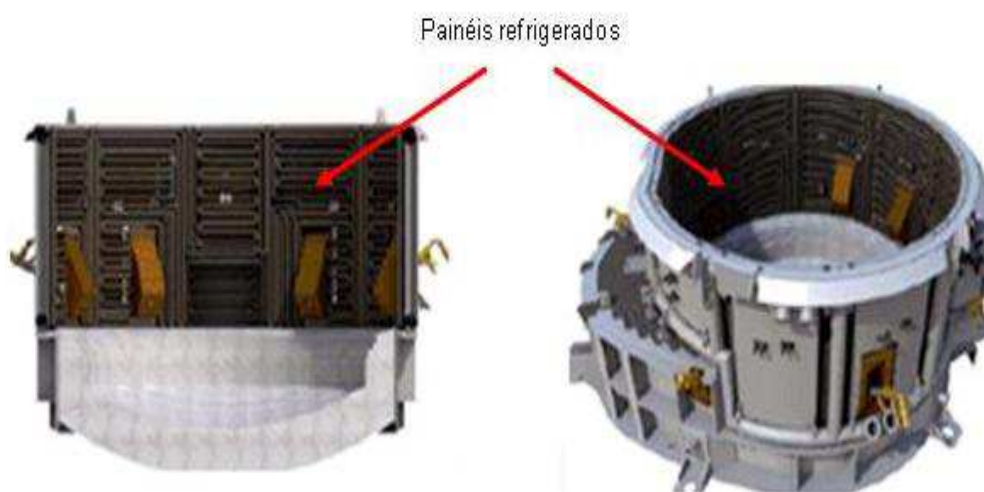


Figura 19 – Vista interna e externa da carcaça com painel refrigerado do forno fusão a arco

Os painéis refrigerados recebem através de convecção e radiação um fluxo de calor, o qual é totalmente transferido para a água de refrigeração. Os

painéis são formados por tubos dentro dos quais circula a água de refrigeração. Desta forma, o sistema é um tubo com escória solidificada em sua superfície externa e a água de refrigeração circulando dentro desse tubo absorvendo todo o fluxo de calor \dot{Q} incidente no painel.

Vale lembrar que o acúmulo de depósitos na parede interna do tubo, em função da qualidade da água, influenciará diretamente na transferência de calor do forno para a água representado na (figura 20).

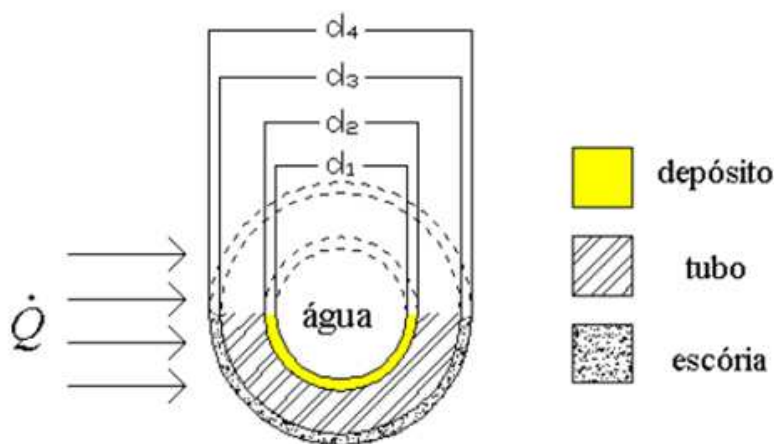


Figura 20 – Vista interna do tubo de refrigeração do painel refrigerado do forno elétrico a arco.

Uma vez impactados pela radiação, o fluxo de calor segue para fora do FEA através dos mecanismos de condução e de convecção que ocorrem nos elementos combinados de tubos de aço-cobre, camadas de escória e massa refratária que os revestem, depósitos de carbonatos e de óxidos na parede interna, além obviamente, da água de refrigeração que deixa o circuito.

As condições operacionais variam muito ao longo de uma corrida:

- Receita da carga fria (densidade variada entre os diversos tipos de metálicos)
- Procedimentos para preparação do cestão
- Forma de carregamento
- Programa de potência elétrica e química

Portanto, que as taxas de radiação de calor para os painéis refrigerados também podem variar drasticamente. Ao projetar os elementos refrigerados, as densidades médias de fluxo de calor não devem ser parâmetros preferenciais,

sendo prática a adoção de valores de pico máximo. Estes fluxos podem ocorrer por períodos curtos, mas podem também reincidir periodicamente (Konus Icesa Manual).

A (figura 21) apresenta algumas estimativas encontradas na literatura para a densidade de fluxo de calor, potência (taxa de energia) por unidade de área de diversos elementos refrigerados. Nos casos de painéis refrigerados, a faixa de 600-700 kW/m² pode ser considerada alta, provavelmente envolvendo casos de arcos muito longos e não cobertos por escória espumante (EAF TECHNOLOGY, 2000).

Ementos	Condição de Operação	q1.max. kW/m ²
Painel e Abóbada	Depende da proteção do Arco elétrico	600-700
Ponta do eletrodo	Submergido na escória	1300-1700
Lança de oxigênio	Submergido no metal	4000-6000

Figura 21 - Densidades de calor através de elementos refrigerados típicos em FEAs.

Para cálculos preliminares, seguem abaixo algumas equações de transferência de calor para tubos de seção circular, simplificadas na forma bidimensional. A (figura 22) mostra um tubo com diâmetros externo d_1 e interno d_2 , que recebe um fluxo de calor q_1 na superfície externa do painel que alcança a temperatura T_1 , em regime permanente de transferência de calor, resultando na temperatura da face interna do tubo a uma temperatura T_2 , estabelecendo-se o gradiente de temperatura ($T_1 - T_2$) ao longo da parede do tubo. O fluxo de calor absoluto kW é o mesmo através de todas as seções, porém, o fluxo por unidade de área não são iguais, visto que as áreas externa A_e e interna A_i são diferentes (Erro! Fonte de referência não encontrada.).

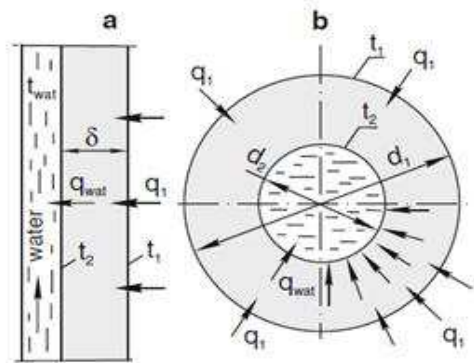


Figura 22 - Representação esquemática de um tubo de painel refrigerado.

$$\frac{q_1}{A_e} \neq \frac{q_w}{A_i} \quad (\text{Eq.1})$$

Sendo $A_e > A_i$ a razão R_A é empregada para corrigir os fluxos por unidade de área. Essa correção é mais importante a medida em que $d_1/d_2 > 1.6$.

$$R_A = \frac{A_i}{A_e} \quad (\text{Eq. 2})$$

No caso de tubos sem revestimento de escória, os mecanismos de transferência de calor considerados são:

Condução através da espessura do tubo incidindo em A_e (Eq.3).

$$\frac{q_1}{A_e} = \frac{k}{\delta} \cdot (T_1 - T_2) \quad (\text{Eq.3})$$

Convecção com água como fluido partir de A_i (Erro! Fonte de referência não encontrada..

$$\frac{q_w}{A_i} = h \cdot (T_2 - T_w) \quad (\text{Eq. 4})$$

A (figura 23) apresenta as estimativas das temperaturas na superfície interna de um tubo com diâmetro 3" Sch 160. As linhas tracejadas significam as temperaturas para ebulição da água a 4 a 8 bar.

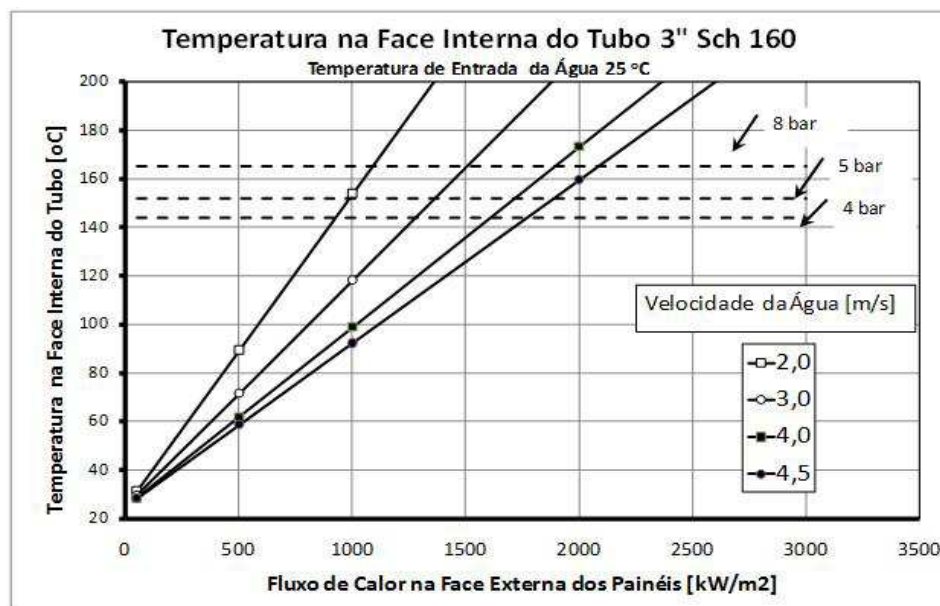


Figura 23 - Efeitos da velocidade de água no interior de dutos 3" Sch 160.

As estimativas constantes da (figura 25) dependem apenas do fluxo de calor incidente, da vazão de água e das dimensões do tubo, mas independem dos materiais que os constituem.

Conforme esperado, quando a vazão cresce, o incremento resultante na velocidade da água, confere uma maior capacidade de extração de calor. Entretanto, não basta extrair mais calor, sendo necessário garantir que as pressões de trabalho mantenham a temperatura de ebulição o mais alto possível (BENHAM and HOYLE, 1998).

2.8.2 Carcaça Spray

Spray (ou chuveiro) de resfriamento é simplesmente a adição de um spray de água ou cortina sobre a chapa do lado interno ("face quente") do forno (figura 26). Usando analogia, é um princípio semelhante à zona de spray utilizado para resfriar tarugos. É comumente utilizado na indústria de produção de aço, e tem a principal vantagem de ser relativamente barato, de fácil manutenção e substituição em caso de avaria. Uma vantagem adicional deste tipo de arrefecimento é que é fácil instalação. Áreas de alto desgaste, como a zona de escória pode ser resfriado utilizando spray ou resfriamento chuveiro com um investimento muito baixo. Para instalar um sistema deste tipo a seguir, não há aberturas na estrutura de aço do forno, é necessária e, portanto, a resistência do forno vai ser tão elevada como antes.



Figura 24 - Painéis refrigerados (sistema spray)

Fonte: courtesy Spray System

Outra vantagem é, no caso de fugas de água, a quantidade de água que vai para o forno é baixa em comparação com água de arrefecimento dos painéis convencionais. Como exemplo, um spray de refrigeração típico do forno opera com 6 litros por minuto por metro quadrado, dispensaria apenas 5 litros por hora. Em contraste, a água arrefecida componente tubular típico forno operando a 60 psi descarregaria mais de 16.000 litros por hora, através do mesmo orifício de tamanho.

Finalmente, este é um sistema muito popular especialmente para abóbada, mas também há instalações em paredes laterais do forno fusão, conforme ilustrado nas (figuras 25, 26 e 27).

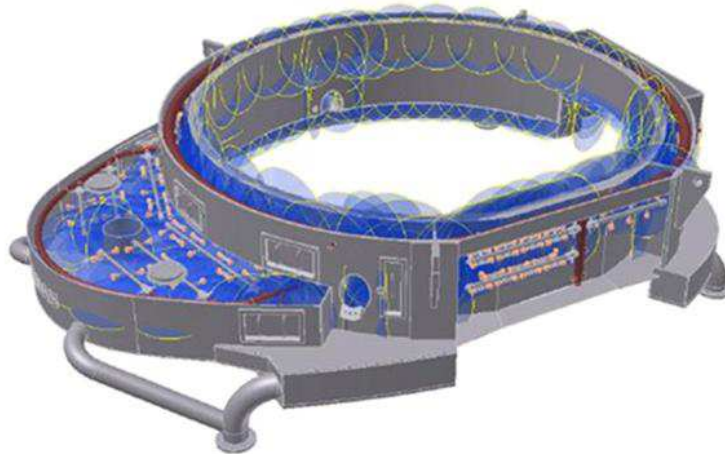


Figura 25 – Ilustração da abrangência do spray na zona refrigerada

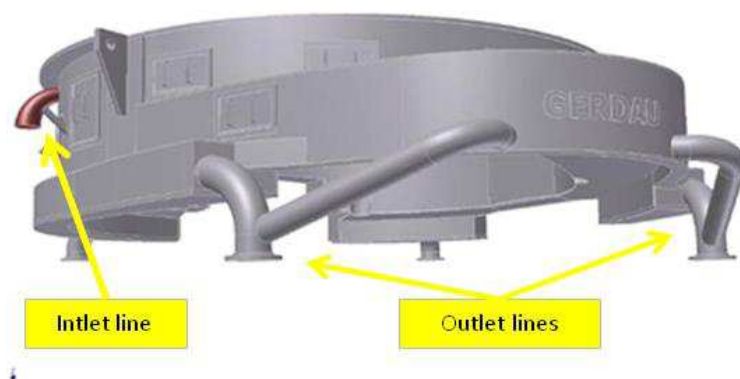


Figura 26 - Ilustração da entrada e saída de água da carcaça spray.

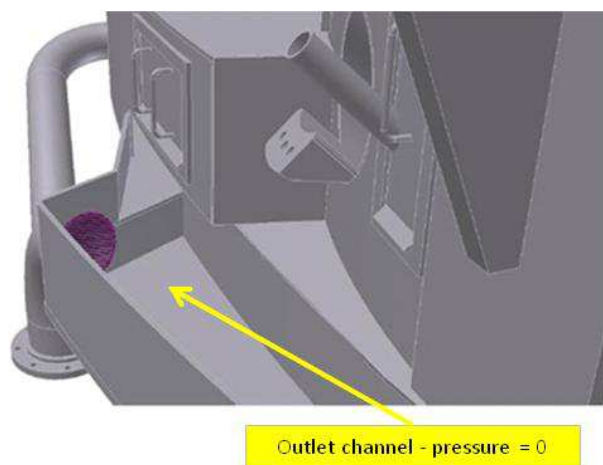


Figura 27 - Ilustração saída de água da carcaça spray.

A principal desvantagem deste tipo de refrigeração é a taxa de resfriamento menor quando comparado à água painéis resfriado. Uma desvantagem adicional deste tipo de arrefecimento é que a sua eficácia diminui com o tempo devido à raspagem e de deposição de poeira e impurezas microbiológicas na superfície do forno da carcaça spray. Sistema spray também tem problemas favorecendo formação ponto quente em grandes áreas, uma vez que filme de água pode ocorrer longe das zonas de impacto. Além disso, este tipo de arrefecimento tem a desvantagem de que o calor é retirado através da carcaça spray do forno, que pode levar a tensões térmicas e a deformação considerável do forno. Isto é especialmente problemático para grandes e UHP (Ultra High Power) Forno Fusão.

Outro ponto importante é a característica da água utilizada na Aciaria, essa tem grande impacto no desempenho dos equipamentos, tendo influência tanto em aspectos de custo (vida dos equipamentos), qualidade e segurança operacional.

A tabela (figura 28) abaixo traz alguns dos requisitos que devem ser atendidos para qualidade da água em diferentes equipamentos de Aciaria.

Índice	Unidade	Água Indireta ou Sem contato
pH (20°C)	pH	7,5 - 9,5
Dureza Cálcio	mg/l CaCO ₃	30 - 200
Dureza Magnésio	mg/l CaCO ₃	0 - 70
Alcalinidade	mg/l CaCO ₃	50 - 200
Cloretos	mg/l Cl	Máx 200
Sulfatos	mg/l SO ₄	Máx 200
Fluoretos	mg/l F	0
Conteúdo Total de Fe	mg/l Fe	Máx 1,0
Íon Solúvel de Fe ²⁺	mg/l Fe ²⁺	Máx 0,2
Cobre	mg/l Cu	Máx 0,05
Sílica	mg/l SiO ₂	Máx 30
Resíduos fixos à 180°C	mg/l	Máx 800
Condutividade	µS/cm	Máx 1500
Sólidos Suspensos Totais (SST)	mg/l	Máx 10
Tamanho máximo SST	µm	Máx 100
Óleos e graxas	mg/l	0
Contagem de bactérias totais	-----	< 10 ⁴
Tipo		B

Figura 28 - Característica da água circulante requerida nos painéis e carcaça refrigerada do Forno Fusão

A dureza da água é a expressão química sobre a presença de cálcio e magnésio, expresso pela equação:

$$Dureza\ Total = Dureza\ Cálcio + Dureza\ Magnésio$$

Normalmente o resultado de análise da dureza total é expresso em ppm (parte por milhão ou mg/litro) de CaCO₃ assim como os resultados das análises de cálcio e magnésio separadas. Pode-se, entretanto receber resultados analíticos em ppm Ca⁺⁺, e ppm Mg⁺⁺ conforme expresso na (figura 29).

Cátions	mg/l	ppm CaCO ₃
Ca ⁺⁺	9,54	23,84
Mg ⁺⁺	1,45	5,96

Figura 29 - Relação dos Componentes Ca e Mg em CaCO₃

Os sais da dureza possuem a solubilidade inversa à temperatura. Significa que aqueceremos a água, os sais cálcio e magnésio irão perder solubilidade, e irão se precipitar formando camadas calcificadas e incrustações (figura 30).

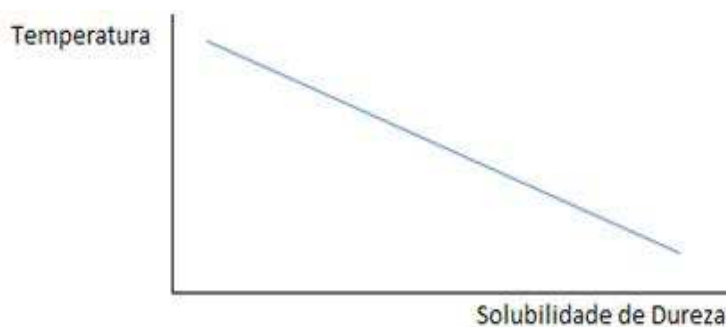


Figura 30 - Relação entre a temperatura da água e solubilidade da dureza.

Nos demais sais como o sal de cozinha (cloreto de sódio), quanto maior a temperatura da água, melhor para a solubilização (figura 31). Outros sais com este comportamento: sulfato de sódio, sulfato de potássio, cloreto de potássio, nitrato de sódio.



Figura 31 - Relação entre a temperatura da água e a solubilidade de sais em geral

As principais incrustações e calcificações (figura 32) formadas são: sulfatos de cálcio/magnésio, carbonatos de cálcio/magnésio, fosfatos de cálcio/magnésio.

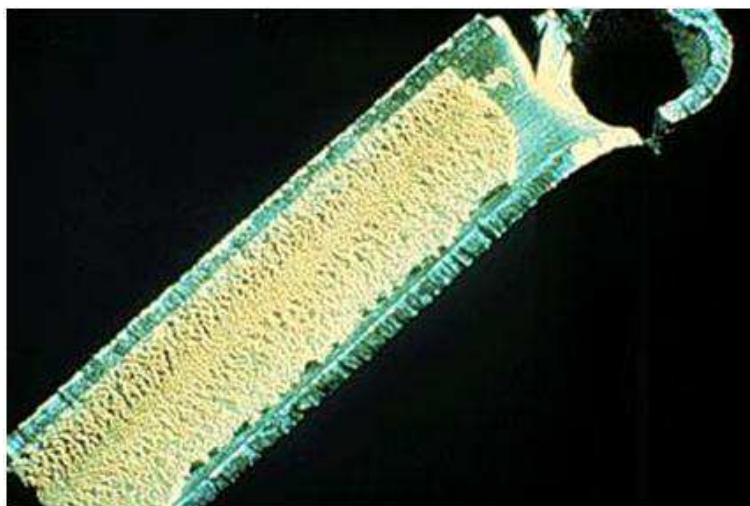


Figura 32 - Imagem típica de incrustação de cálcio em tubulações

As incrustações e calcificações podem ser controladas quimicamente ou mecanicamente. Os controles químicos são feitos por dois tipos de processos: “inibição” ou “dispersão”. A inibição consiste na adição de polímeros inibidores que reagem com os íons metálicos (como o cálcio) para formar complexos solúveis, evitando ou retardando a formação das incrustações.

O controle químico por dispersão consiste na adição de inibidores dispersantes. Estes atuam no sentido de controlar o tamanho das partículas (figuras 33 e 34), interferindo na aglomeração e crescimento das mesmas. Estes inibidores adsorvem na superfície das partículas, fornecendo excesso de cargas negativas que causam repulsão das partículas uma às outras.



Figura 33 - Mecanismo de dispersão química para controle de incrustação de cálcio.

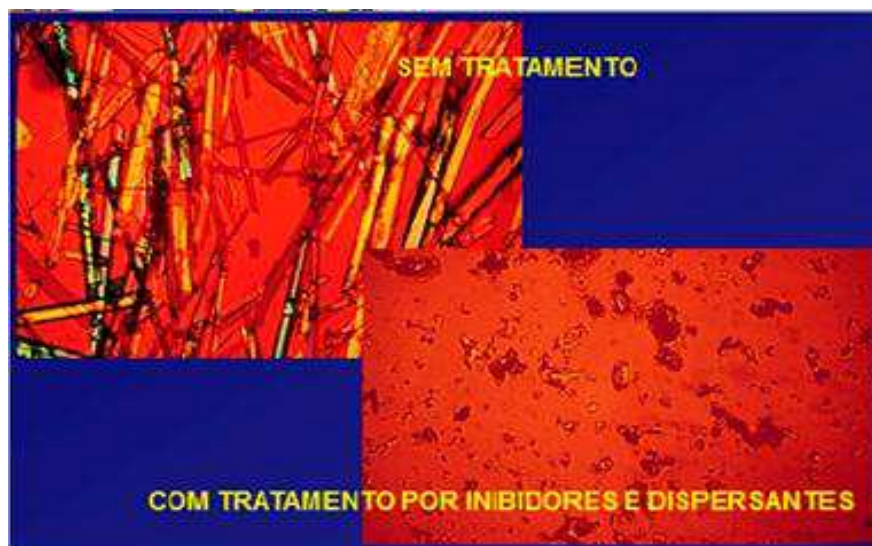


Figura 34 - Imagem comparativa da água com e sem tratamento por inibidores e dispersantes.

O controle mecânico pode ser feito por remoção dessa incrustação ou por ajustes no processo. A remoção mecânica pode ser feita por: abrandamento, clarificação, filtração, filtração lateral e limpeza. Exemplos de ajustes no processo são: aumento da velocidade, aumento de purga para desconcentração, adequações no desenho de equipamentos, redução da temperatura e ajustes no pH.

2.8.2.1 Design Carcaça Spray

Um dos pontos de maior atenção no projeto da carcaça spray é abordar o fluxo de água suficiente em pontos quentes. Nas zonas mais quentes, a densidade da água (gal/min/ft²) é aumentada, bem como a água pulverizada se destina a ser "empurrar para fora" do sistema. Neste caso, deve ser tomada atenção para evitar sistema de "excesso", quando existe demasiada água no interior do sistema, devido a um filtro ligado, por exemplo. Uma vez que o reservatório de retorno de pulverização não é pressurizado, a água de retorno tem que ser removido utilizando um sistema de bomba de vácuo, em especial para a abóbada e da parede lateral.

Uma boa prática de escória espumante é essencial para proteção da abóbada e laterais refrigeradas para aumentar a resistência ao desgaste. Isto proporciona o isolamento a partir do calor do forno e prolongar a vida de serviço e fiabilidade.

Aderência escória no interior da carcaça spray é muito importante, especialmente para evitar formação de arco. Um aspecto fundamental em carcaça spray é garantir retentores de escória ("âncoras") em boas condições, sem desgaste excessivo, normalmente, ela é usada "estilo ferradura". Para as áreas de ponto quente extremo, retentor de cobre pode ser usado. O cobre tem uma taxa de transferência de calor mais elevado do que o aço, eles ajudam a "congelar" escória.

Bicos:

Bicos de pulverização estão disponíveis em uma variedade de capacidades. Os bicos mais comumente empregados em resfriamento de equipamentos tem capacidade entre 2,6 e 9 gpm por bico a 30 psig e têm um padrão de pulverização completa 120 graus. Capacidade bocal ângulo de orientação do bocal e da distância do bocal é afastado da superfície arrefecida determinar a taxa de fluxo de água de arrefecimento por unidade de área (gpm / pés quadrados) e a quantidade de sobreposição de cobertura.

Ao longo dos últimos 20 anos, existe uma considerável evolução no desenho do bicos para esses sistemas. Bicos de jato em espiral (muito pequena passagem sem furo) e evolui facilmente acopláveis para maiores bicos furo.

2.8.3 Materiais para Construção

2.8.3.1 Aço Carbono

O aço é o material mais comumente usado para fabricação de painéis refrigerados. Tem a limitação de vida, pois sofre ao longo de seu uso o fenômeno de fadiga térmica. Pode ser empregado em várias formas:

- Chapas: é usado quando temos painéis tipo caixa (figura 35).

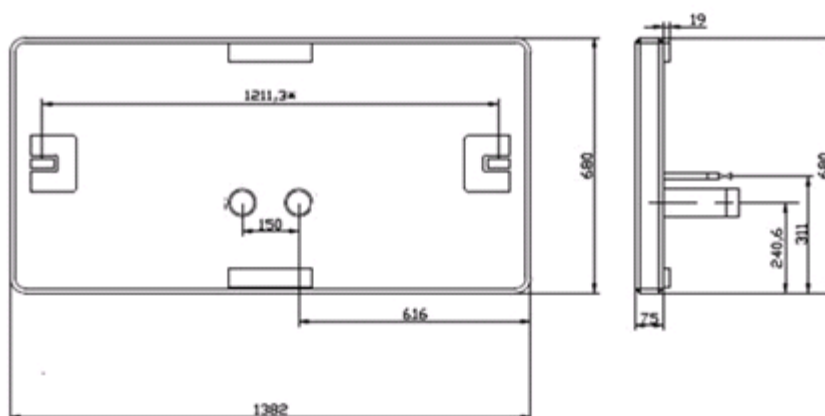


Figura 35 - Painel refrigerado tipo caixa

Fonte: Cortesia Konus Icesa

O aço normalmente utilizado é o ASTM A285C grau B e espessura de 10 mm.

- Tubos: material mais utilizado (figura 36). Os tubos devem ser sem costura, diâmetro 2 ½ " ou 3 ", espessura da parede SCH 160. Tipo de aço normalmente utilizado: ASTM 106 grau B.

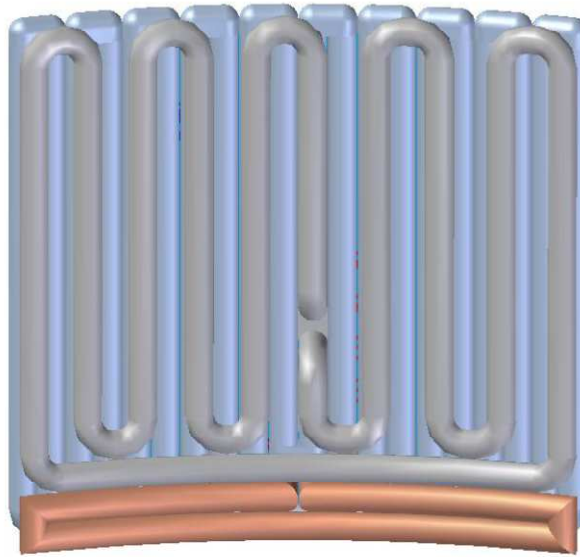


Figura 36 - Painel refrigerado tipo Tubo – Desenho ilustrativo

2.8.3.2 Cobre

O cobre é utilizado em regiões com maior agressão térmica, pois seu coeficiente de transmissão de calor é quatro vezes maior que o do aço, (figura 37). Por ser um metal puro não sofre do fenômeno da fadiga térmica e teoricamente sua vida é infinita e desta forma pode substituir os painéis de aço com desempenho superior. As desvantagens são:

- Resistência mecânica: sofrem abrasão e possibilidade de amassamento durante a operação de carregamento do FEA
- Suscetíveis à fusão quando em contato com respingos de aço/escória líquida
- Normalmente os painéis são feitos de tubos tipo ASTM B188 com 99,8 % de pureza, diâmetro de 89 mm e parede de 10 mm.
- Tubos extrudados aletados: são usados para aumentar a aderência da escória nos painéis.

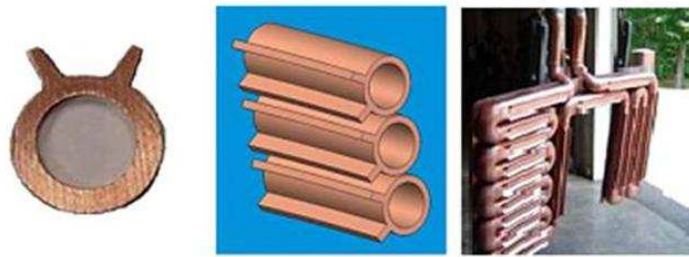


Figura 37 - Tubos extrudado utilizado no painel refrigerado do forno elétrico a arco

Fontes – Cortesia Lumar Metals

As regiões do FEA em que mais se aplica os painéis de cobre são:

- Região próxima à linha de escória (figura 38).



Figura 38 - Painéis de cobre na linha de escória da carcaça refrigerada

Fonte: Cortesia Bk Services GmbH

- Painel sobre a bica excêntrica (figura 39).

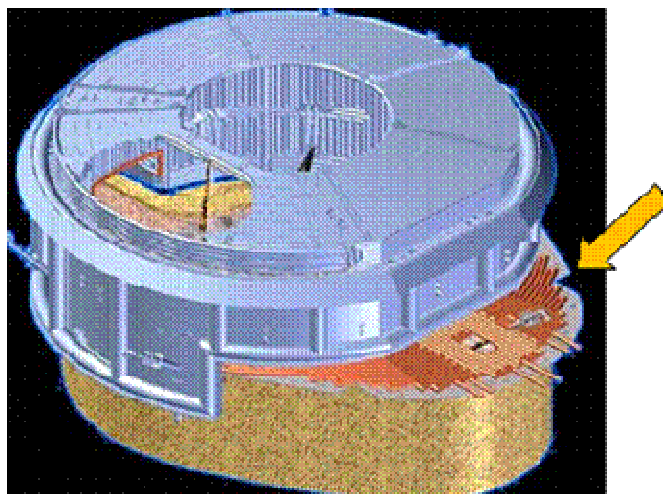


Figura 39 - Painel sobre a bica excêntrica – Cortesia Lumar Metals

- Blocos de injetores/queimadores (figura 40).



Figura 40 - Blocos de injetores/queimadores – Cortesia Danieli

2.9 Transferência de Calor no FEA

2.9.1 Transferência de Calor

É energia térmica em trânsito devido à diferença de temperaturas no espaço, existem três formas de transferência de calor (Holman, Jack Philip, 1995):

- **Condução** se dá através de sólidos e em fluidos (líquidos e gases) sem movimento,
- **Convecção** se dá através de fluidos em movimento,
- **Radiação** não necessita de um meio para se propagar.

O calor normalmente é transferido simultaneamente por condução, convecção e radiação. Cada tipo de transferência de calor está sujeito a diferentes leis e devem ser tratadas separadamente. Mas a convecção não pode ser totalmente separada da condução porque o calor deve passar por condução para o fluido em movimento que está em contato com a superfície aquecida.

2.9.2 Transferência por Condução

A lei básica da condução de calor é baseada nas observações experimentais de Fourier, concluindo que a densidade do fluxo de calor q_x por unidade de área [W/m²], em muitos casos, é diretamente proporcional à diferença de temperatura ($T_1 - T_2$), e inversamente proporcional à espessura da parede L , conforme representação esquemática (figura 41).

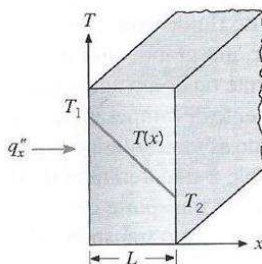


Figura 41 - Transferência de calor unidimensional por condução.

(Eq. 5)

$$q_x = -k \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{L}$$

Nota: o sinal “negativo” é uma consequência do fato da energia a ser transferida na direção da menor temperatura.

A lei de Fourier é a lei básica de transferência de calor de condução também é apresentada conforme (Eq. 6, considerando o exemplo da transferência de calor a partir de uma parede com superfície plana, largura e comprimento infinitamente grande. Neste caso, a temperatura varia só na direção de eixo X perpendicular às superfícies da parede.

$$q_x = -k \cdot \frac{dT}{dx} \quad (\text{Eq. 6})$$

onde:

q_x é o fluxo de calor por unidade de área [W/m²]

k [W/(m.°C)]: é constante de proporcionalidade é uma propriedade física do material (meio onde ocorre a condução) denominada condutividade térmica, e vem exprimir a maior ou menor facilidade que o material apresenta à condução de calor.

$\frac{dT}{dx}$ [K/m]: é o gradiente de temperatura ao longo da espessura da parede

Nota: Temperatura na unidade K (Kelvin) $T[K] \approx T[^\circ C] + 273$

A condutividade térmica dos sólidos são 1.000-10.000 mais elevadas do que os fluidos (figura 42).

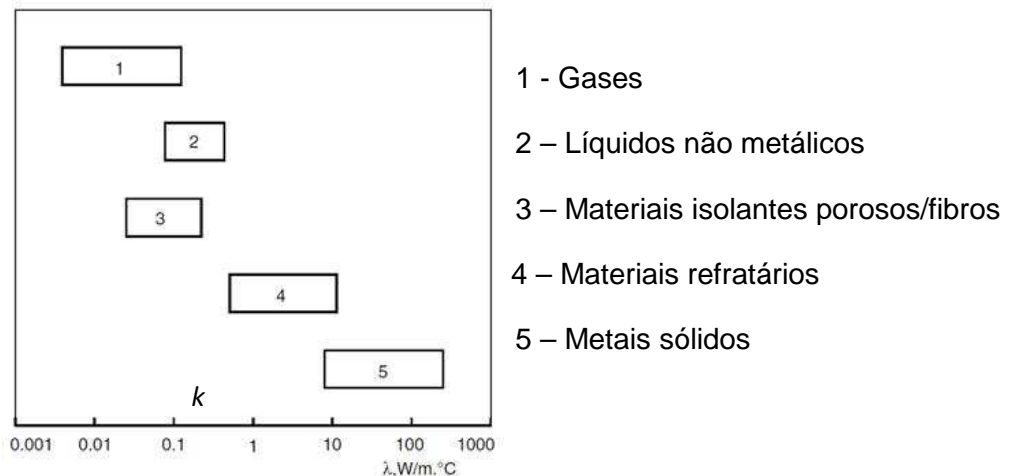


Figura 42 - Intervalo de condutividade térmica para substâncias diversas

Como regra geral (figura 38):

- Líquidos não metálicos apresentam $k < 0,7$ [W/(m.oC)]. Por exemplo, a água líquida é um dos melhores condutores de calor. Sua condutividade térmica $k \approx 0,6$ [W/(m.oC)] mantêm-se razoavelmente estável.
- A condutividade térmica do metal líquido é muito maior que a da água, por exemplo, para o ferro líquido $k \approx 23$ [W/(m.oC)].
- Materiais isolantes fibrosos/porosos, os valores de $k < 0,25$

[W/(m.oC)] são típicos. A condutividade térmica dos materiais como lã de vidro por ter baixa densidade, como a baixa densidade se aproxima da condutividade térmica do ar que preenche os poros.

- Os valores de λ para materiais refratários mais densos se encontram na faixa 0.1-0.4 [W/(m.oC)]. A condutividade térmica dos produtos refratários usados em FEAs depende da sua composição e varia na faixa de 1.5-3.0 [W/(m.oC)].
- A condutividade térmica de gases aumenta fortemente com a temperatura.

2.9.3 Transferência por Convecção

O modo de transferência de calor por convecção inclui dois mecanismos, por difusão (ou condução) próxima a superfície de contato entre as substâncias em contato, ou na “camada-limite térmica” e pelo movimento do fluido na presença de um gradiente de temperatura.

Supondo uma chapa plana aquecida a uma temperatura maior do que a de um fluido (líquido ou gasoso) que se movimenta paralelamente a superfície de contato entre ambos, assume-se:

- Forma-se um volume no fluido em que a sua velocidade varia desde zero até um valor finito, correspondente a velocidade do fluido distante desta superfície. Este valor define a espessura da chamada “camada-limite térmica”.
- Neste limite, a temperatura corresponde à temperatura no seio do fluido, menor do que a temperatura na superfície da chapa. Estabelece-se um gradiente de temperatura.

A troca de calor por convecção entre uma superfície de um corpo sólido e um fluido, que escoar em seu entorno é um processo muito complexo. Na verdade, muito do conhecimento sobre a convecção é baseado nos resultados de estudos experimentais. Apesar dos processos e das geometrias dos casos industriais serem extremamente diversos (tubos, chapas, etc), os cálculos

práticos são realizados utilizando uma mesma fórmula simples, derivada de uma das leis de Newton (Eq. 7):

$$q = h \cdot (T_S - T_\infty) \quad \text{Eq. 7}$$

Onde:

q é o fluxo de calor por unidade de área [W/m^2]

h é o coeficiente de transferência de calor por convecção [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$] ou [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

T_S é a temperatura na superfície do sólido

T_∞ é a no seio do fluido

O coeficiente de transferência de calor por convecção h depende de um grande número de fatores tais como a natureza de movimento do fluido (laminar, turbulento) e as suas propriedades físicas (viscosidade, densidade) que podem variar muito com a temperatura, a geometria e dimensões da superfície sólida em contato com o fluido. A (figura 43) apresenta faixas típicas em que o coeficiente de transferência de calor por convecção foi estimado.

Meio	kcal/h.m ² .°C		W.m ² .°C	
Ar, convecção natural	5	25	10	30
Vapor, convecção forçada	25	250	30	290
Óleo, convecção forçada	50	1.500	60	1.740
Água, convecção forçada	250	10.000	290	11.630
Água convecção em ebulição	2.500	50.000	2910	58150
Vapor em condensação	5.000	10.000	5.820	11.630

Figura 43 - Valores típicos dos coeficientes de transferência de calor por convecção.

(Conversão aproximada entre unidades 1 kcal/h ~ 860 W)

De acordo com a natureza do escoamento do fluido, dois modos são

considerados:

- I. Laminar (as camadas de fluido tem movimento paralelo às paredes do duto, e quase não se misturam).
- II. Turbulento (movimento aleatório das camadas de fluido, com grande mistura).

2.9.4 Transferência por Radiação

A radiação de calor de um corpo em outros corpos é parcialmente absorvida e parcialmente refletida (figura 44). A parcela de energia, que se reflete, incide sobre os corpos que estão no mesmo ambiente, incluindo o emissor inicial. A radiação refletida, por sua vez, é absorvida e refletida por todos os corpos que participam no processo (EUROPEAN ELECTRIC STEEL CONGRESS, 1995).

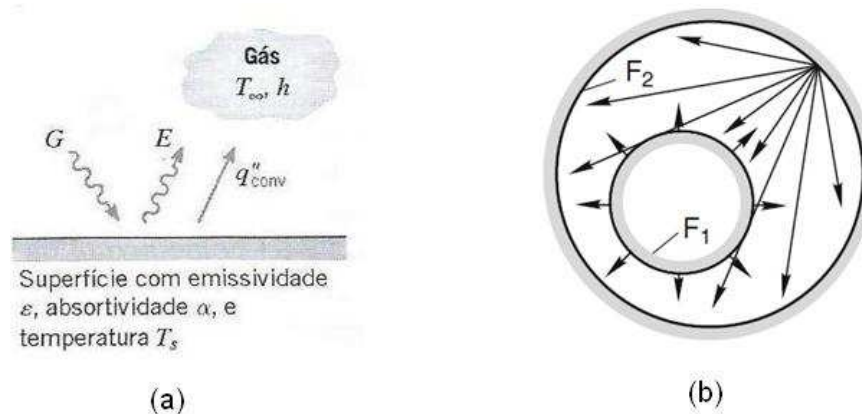


Figura 44 - Troca por radiação (a) em uma superfície e (b) entre uma superfície e uma vizinhança.

O poder emissivo E_n foi definido por (BOWMAN, B, 2009) como, onde σ é a constante que leva seu nome, $5,67 \times 10^{-8} \text{ [W/(m}^2\text{.K)]}$ e ε é a emissividade de um corpo (é uma propriedade radiante de uma superfície),

$$E_n = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad \text{Eq. 8}$$

- I. O valor ε determina tanto a capacidade de emissão (radiação) da superfície de um corpo, assim como a sua capacidade de absorção.
- II. Este valor pode variar dentro dos limites de zero a unidade.
- III. Se $\varepsilon = 1$, então o corpo absorve toda a energia radiante incidente de acordo com Eq. 8 São chamados de corpos negros.
- IV. Para uma dada condição de temperatura e comprimento de onda, nenhuma superfície pode emitir mais do que um corpo negro.
- V. A emissão de um corpo negro é difusa (em todas as direções).
- VI. Se $\varepsilon = 0$, o corpo não absorve, mas reflete toda a energia radiante incidente. Esse corpo não consegue absorver nem irradiar energia. Esses corpos são chamados de corpos brancos.
- VII. Os corpos com valores intermediários $0 < \varepsilon < 1$ são chamados de corpos cinzentos.

Emissividade é a relação entre o poder de emissão de um corpo real ou cinza E_c e o poder teórico de emissão de um corpo negro E_n . Estes valores encontram-se tabelados na literatura, medidos experimentalmente (SESHADRI, V. 2010)

$$\varepsilon = \frac{E_c}{E_n} \quad \text{Eq. 9}$$

A taxa líquida de transferência de calor por radiação saindo de uma superfície com temperatura T_s^4 maior do que a temperatura de sua vizinhança T_{viz}^4 , é comumente expressa por unidade de área,

$$q_{rad} = \frac{q}{A} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{viz}^4) \quad \text{Eq. 10}$$

2.9.5 Efeito Combinado de Condução, Convecção e Radiação no FEA

Uma vez conhecida a energia transferida pelo arco elétrico, à quantidade de calor que será irradiada, pode ser estimada deduzindo-se as porções que são destinadas aos eletrodos e à emulsão aço-escória. Presume-se que 18% da energia do arco elétrico é transferida para a emulsão aço-escória, e 2% para eletrodos, portanto, aproximadamente 80% é irradiada para a carga sólida, fases líquidas aço-escória (banho) e para as demais partes do FEA (INCROPERA F. 2008). Estima-se que o calor incidente sobre os painéis refrigerados de abóbada e de carcaça por radiação seja superior a 95% da energia total que não vai para a carga sólida, banho e eletrodos. Assim, o fluxo de energia via os mecanismos de convecção e condução no interior do FEA, são comparativamente muito baixos (figura 45). Além disso, a perda térmica no FEA via painéis refrigerados, ocorrem especialmente no período final de fusão e durante o sobreaquecimento. As perdas de energia através dos painéis refrigerados podem variar entre fornos de acordo com as condições de escória espumante, espessura da escória depositada nos painéis e comprimento de arco:

Excelente: 25 - 35 kWh/t
Regular: 40 - 50 kWh/t
Perdas altas: 50 - 70 kWh/t
Preocupante: > 70 kWh/t

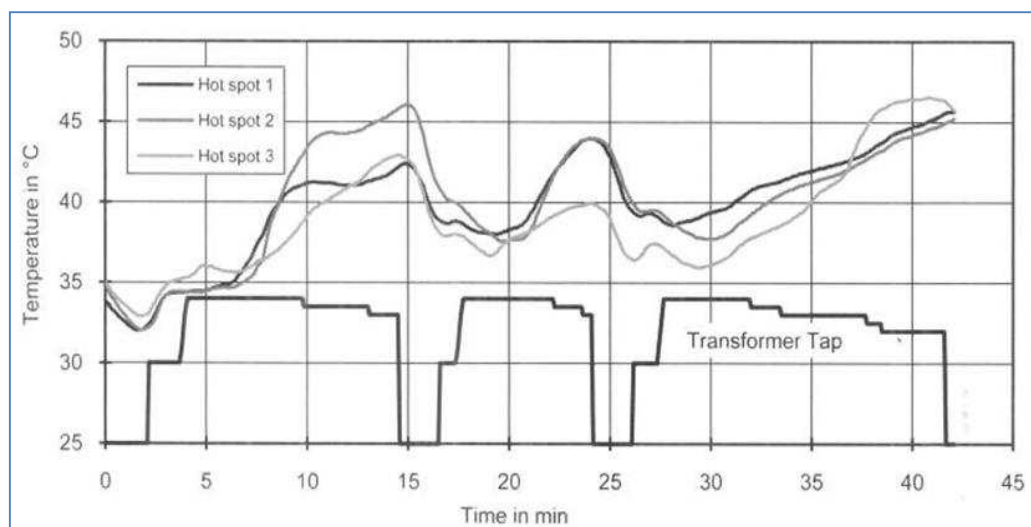


Figura 45 - Aquecimento de painéis refrigerados durante a fusão de três cargas no forno.

Uma vez impactados pela radiação, o fluxo de calor segue para fora do FEA através dos mecanismos de condução e de convecção que ocorrem nos elementos combinados de tubos de aço-cobre, camadas de escória e massa refratária que os revestem, depósitos de carbonatos e de óxidos na parede interna, além obviamente, da água de refrigeração que deixa o circuito.

As condições operacionais variam muito ao longo de uma corrida, portanto as taxas de radiação de calor para os painéis refrigerados também podem variar drasticamente. Ao projetar os elementos refrigerados, as densidades médias de fluxo de calor não devem ser parâmetros preferenciais, sendo prática a adoção de valores de pico máximo. Estes fluxos podem ocorrer por períodos curtos, mas podem também reincidir periodicamente.

2.9.6 Deformação Devido a Variação do Ciclo Térmico no FEA

As deformações térmicas irão aparecer tanto por tração quanto por compressão.

Podemos exemplificar uma situação com 2 níveis de intensidade.

Nível 1: O aquecimento provoca deformação térmica e tensão elástica correspondente que são diretamente proporcionais ao aumento de temperatura (figura 46). Quando mantido à temperatura final de aquecimento, alívio deverá ocorrer e as tensões diminuirão com o passar do tempo. Com o resfriamento, o material deverá reduzir no mesmo montante que expandiu quando aquecido, desta forma tensões residuais de tração deverão surgir, na mesma magnitude do alívio de tensão quando aquecido. A repetição do ciclo fará com que haja alívio até que as tensões cíclicas geradas sejam totalmente de tração.

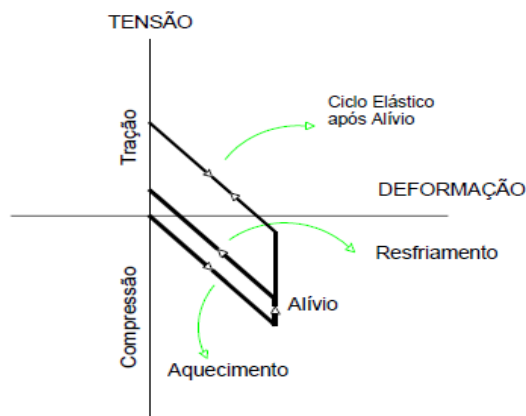


Figura 46 - Deformação por tração e compressão.

Nível 2: Consideremos que a deformação imposta no primeiro aquecimento seja grande o bastante que cause deformação plástica, e seguirá com um alívio de tensão na temperatura final de aquecimento (figura 47). No resfriamento, a deformação de tração será equivalente à deformação plástica total durante o aquecimento e o alívio de tensões na temperatura final de aquecimento, fazendo que uma deformação plástica venha a surgir durante a tração. Aparentemente os danos causados por esse ciclo térmico são maiores do que o Nível 1 já que ocorrem maiores deformações plásticas em cada ciclo. Nível 2:

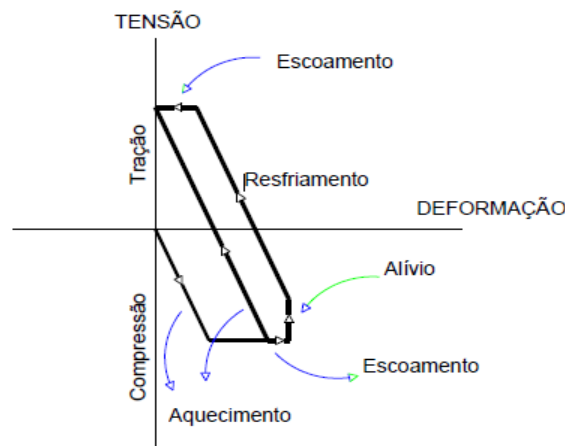


Figura 47 - Deformação por tração e compressão.

O nível de alívio que ocorrerá a cada ciclo dependerá da tensão, temperatura e o do tempo que a temperatura é mantida, assim como a resistência à fluência do material.

2.10 Falhas no Painel Refrigerado

Todas as falhas em painéis redundam em vazamentos de água e normalmente ocorrem na parte exposta ao calor do FEA. Duas falhas comuns são rebote de chama ou oxigênio no painel e arco elétrico aberto contra painel.

Quando isto ocorre acontece a fusão do material base do painel causando a perfuração do mesmo conforme ilustrado na (figura 48).

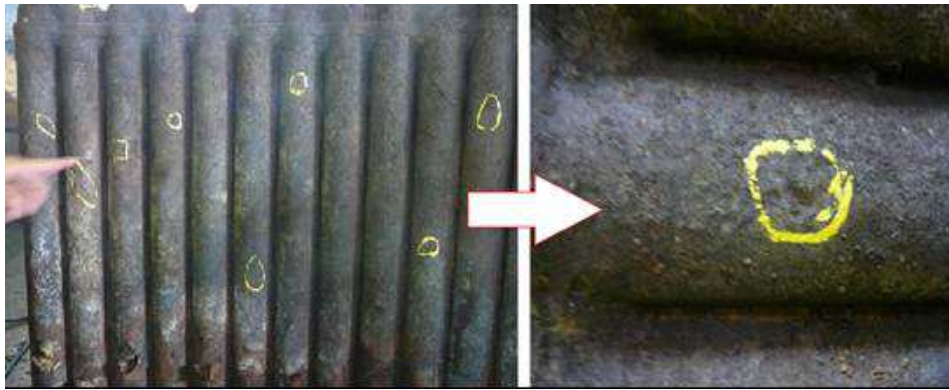


Figura 48 – Imagem ilustrando painel refrigerado e ponto perfurado por arco elétrico

Os problemas relacionados a estes danos são associados à qualidade do aterramento dos painéis e do FEA. Abaixo um exemplo de aterramento de um forno, (figura 49):

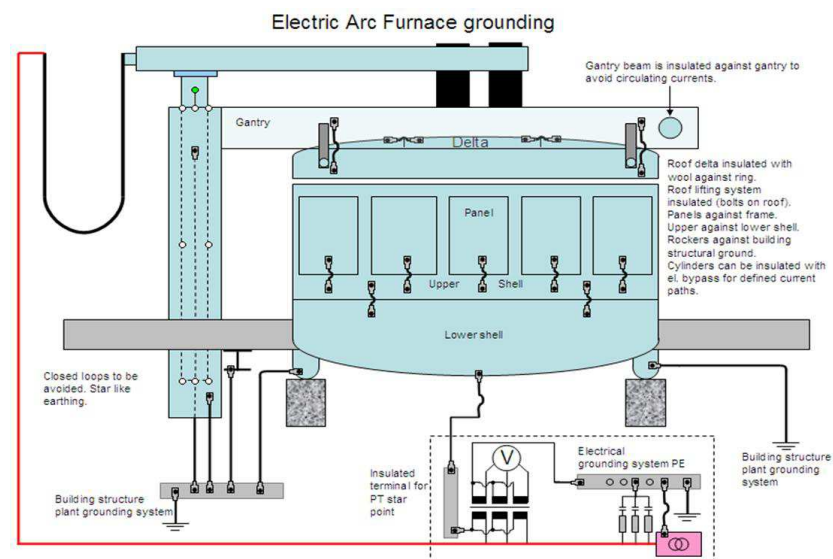


Figura 49 - Sistema de aterramento do FEA

O rebote é um fenômeno que acontece em fornos que tenham queimadores e/ou injetores de oxigênio (figura 50). É caracterizado pelo retorno contra o painel do jato de injeção ou da chama quando os mesmos encontram uma superfície grande não fundida defronte.

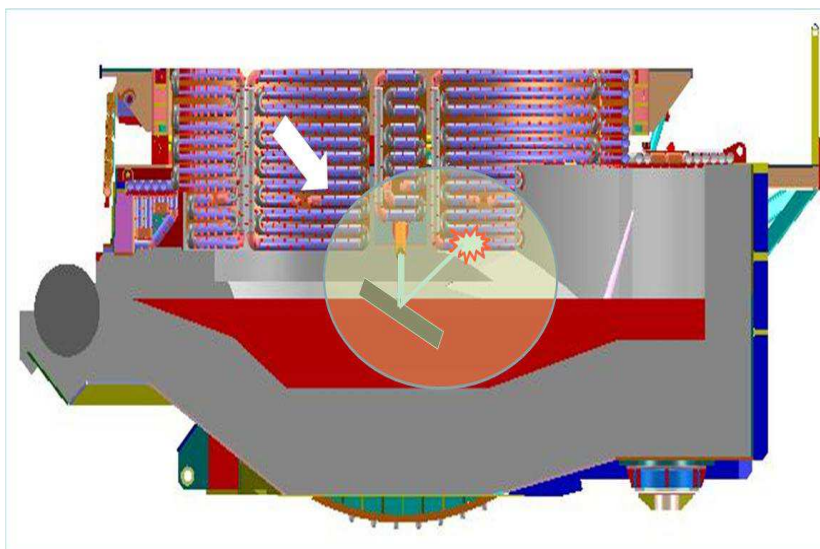


Figura 50 - Ilustração de rebote de oxigênio no painel refrigerado do forno.

O fenômeno de fusão da superfície do painel pode ocorrer de duas formas conforme o tipo de material utilizado no painel, aço ou cobre.

No caso de injeção de oxigênio o cobre funde devido ao arraste de aço líquido junto com o jato ou reação de difusão quando de jatos supersônicos (figura 51).



Figura 51 - Painel de cobre - fusão por arraste de oxigênio

No caso de chama de queimadores (figura 52) a fusão se dá por excesso de calor.

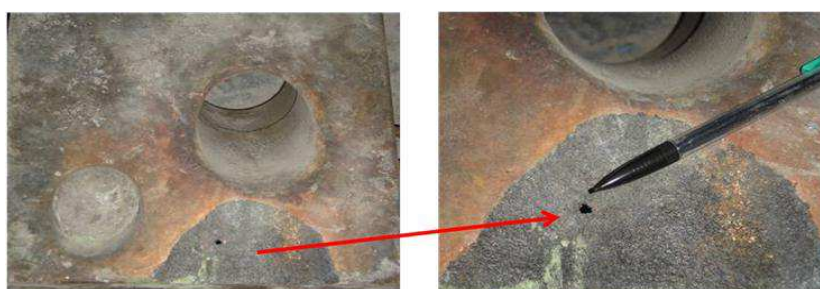


Figura 52 - Fusão painel por excesso de calor gerado pelo queimador.

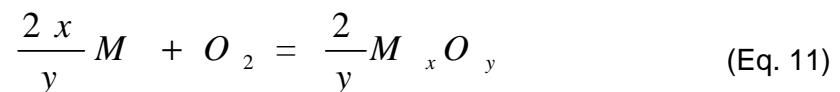
O material do painel de aço (figura 53) reage facilmente com o oxigênio e funde por reação química. Quando do uso de queimadores funde por ação do excesso de calor.



Figura 53 - Fusão do tubo de aço da carcaça pela reação do oxigênio devido rebote.

2.11 Estabilidade Termodinâmica de Óxidos

A formação de um óxido M_xO_y ocorre em um metal M se a energia livre ΔG^0 da seguinte reação é negativa:



A pressão parcial de oxigênio de equilíbrio para esta reação é:

$$P_{O_2} = \frac{a_{M_x O_y}^{2/y}}{a_M^{2x/y}} \exp(\Delta G^0 / RT) \quad (\text{Eq. 12})$$

onde a_M é a atividade termodinâmica do óxido em formação na liga metálica (1 para metal puro) e $a_{M_xO_y}$ é a atividade termodinâmica do óxido em uma solução sólida de óxidos ou em óxidos ternários. Os valores de ΔG^0 estão dados em tabelas e na literatura (KOFSTAD, 1988; KUBASCHEWSKI e ALCOCK, 1979). Quanto mais negativo é ΔG^0 mais estável é o óxido (KOFSTAD, 1988). Além

disso, existem gráficos de $\Delta G = f(T)$. A (figura 54) apresenta a relação entre energia livre de formação de um óxido de metais puros e temperatura para diversas reações óxido-metal.

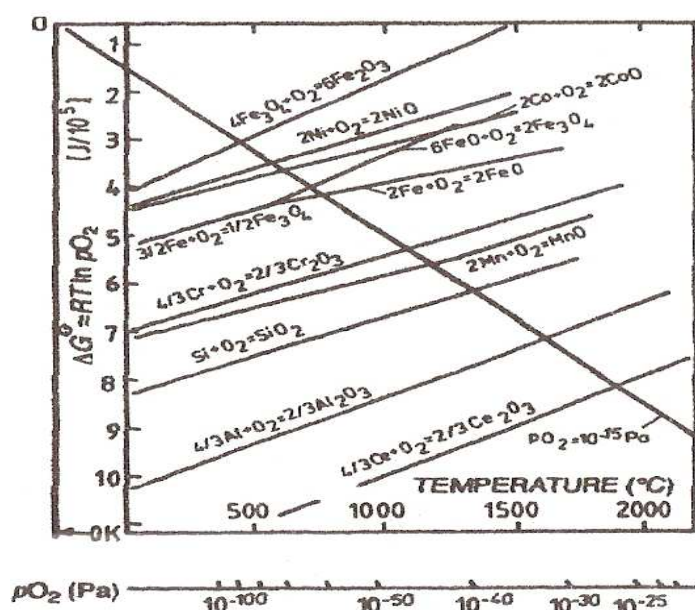


Figura 54 - Relação entre a energia livre da formação de um óxido de metais puros e temperatura para diversas reações óxido-metal [SCHÜTZE, 2001].

2.12 Difusão em Camadas Oxidas

Na atmosfera industrial a maioria das misturas contém diversos componentes que podem reagir com o material para formar outros produtos da corrosão além dos óxidos. A estabilidade do óxido protetor nestas atmosferas depende das pressões e/ou das atividades parciais dos componentes individuais (SCHÜTZE, 2001). Para ajudar na identificação de óxidos estáveis, diagramas de estabilidade foram criados (KOFSTAD, 1988). As regiões calculadas de estabilidade para os produtos individuais da corrosão são mostradas em função da pressão parcial. Um exemplo para ambientes que contêm carbono e oxigênio está disposto na (figura 55).

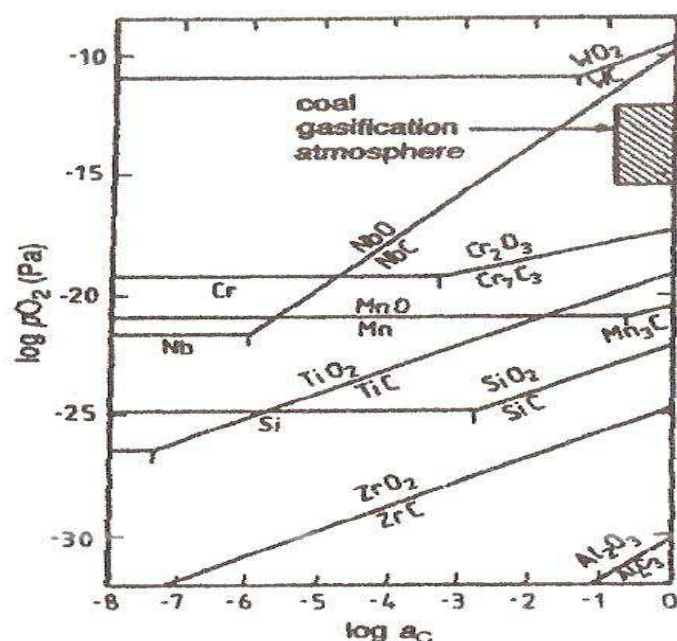


Figura 55 - Diagrama de estabilidade para os óxidos e carbetos de vários elementos a temperatura de 950 °C (SCHÜTZE, 2001).

Um requerimento essencial para a aplicação de materiais metálicos a altas temperaturas está na resistência de oxidação e corrosão.

A quase totalidade dos materiais usados industrialmente, bem como suas ligas, é suscetível à corrosão quando expostos a agentes oxidantes como, por exemplo, oxigênio, enxofre, halogênios, dióxido de enxofre, gás sulfídrico e vapor de água (PILLIS, 2002; RAMANATHAN, 2002). Isto acontece quando formas protetoras de camadas oxidadas estão sobre a superfície. As camadas oxidadas podem aparecer por meio de uma reação dos elementos do material com oxigênio ou elas podem ser produzidas quando o material metálico é submetido a uma atmosfera oxidante. Essa camada óxida, evidentemente, é que vai ditar, de acordo com suas características, a possibilidade de o processo de corrosão prosseguir. Sendo assim, é importante para os processos de corrosão estudar como essa camada se forma e cresce em função das variáveis meio corrosivo e tempo de exposição.

Esse comportamento é decorrente das reações serem exotérmicas, sendo, portanto, termodinamicamente possíveis em temperaturas elevadas, onde o decréscimo de energia livre é menor, a reação é mais favorecida

cineticamente e as velocidades de oxidação são consideradas maiores (CALLISTER, 2007).

As camadas protetoras são aquelas que crescem lentamente com alta integridade na superfície do metal. Neste caso, a taxa que determina a etapa quando o equilíbrio foi estabelecido nos contornos da fase do metal, óxido e/ou gás é a difusão dos cátions e/ou ânions que dá a forma a elementos e também dos elétrons através dos defeitos de rede (vacâncias, intersticiais) na camada do óxido.

2.13 Equações de Oxidação

As equações que representam a velocidade de oxidação de um dado metal com o tempo são funções da espessura da camada de óxido e da temperatura. A (figura 56) representa as curvas de oxidação. Existem três equações principais que exprimem a espessura (Y) da película formada em qualquer metal no tempo (t):

- linear
- parabólica
- logarítmica

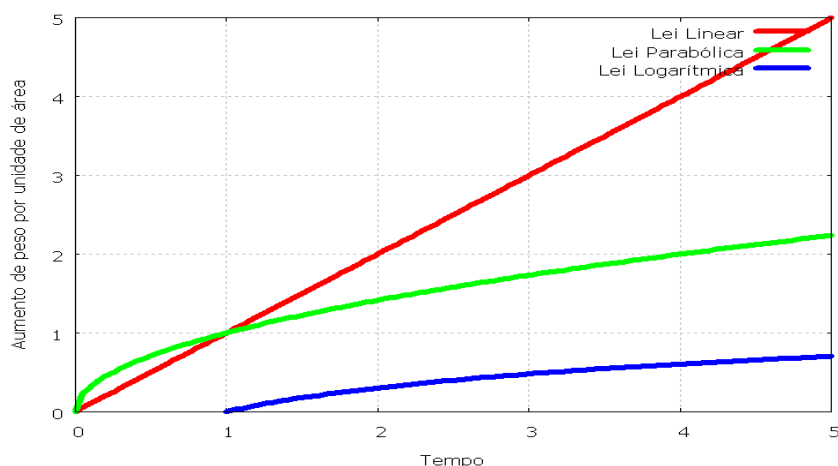


Figura 56 - - Representação esquemática das curvas de oxidação

2.13.1. Equação linear

A velocidade de oxidação é constante (K)

$$\frac{dY}{dt} = K \quad (\text{Eq. 13})$$

Integrando, tem-se:

$$Y = Kt + A \quad (\text{Eq. 14})$$

A é a constante de integração que define a espessura da película no período inicial de oxidação ($t = 0$). Evidentemente, se a oxidação se iniciar em uma superfície limpa a constante A é desprezada. É a equação seguida geralmente pelos metais cuja relação entre o volume do óxido formado e o volume de metal consumido é menor do que um. Isto é, a película é muito porosa e não impede a difusão. Alguns metais que apresentam relação maior do que um seguem também esta lei, acima de determinadas temperaturas, como por exemplo: Fe, Ti e W.

2.13.2 Equação parabólica

A difusão de íons ou a migração de elétrons através da película é controlada e a velocidade será inversamente proporcional à espessura da película.

$$\frac{dy}{dt} = \frac{K}{y} \quad (\text{Eq. 15})$$

Integrando, tem-se:

$$Y^2 = 2\dot{k}t + A \quad (\text{Eq. 16})$$

É a equação seguida geralmente pelos metais cuja relação entre os volumes de óxido formado e de metal consumido é maior do que um, isto é, os que formam películas protetoras, pouco porosas (DIECKMANN, 1983). Essa equação é seguida por muitos metais (Fe, Cu, Ni, Cr, Co) em temperaturas elevadas. Com o aumento da temperatura a película fica mais espessa, dificultando a difusão iônica e a eletrônica. A (figura 57) mostra uma representação esquemática dos processos de transporte na escala durante o crescimento do óxido.

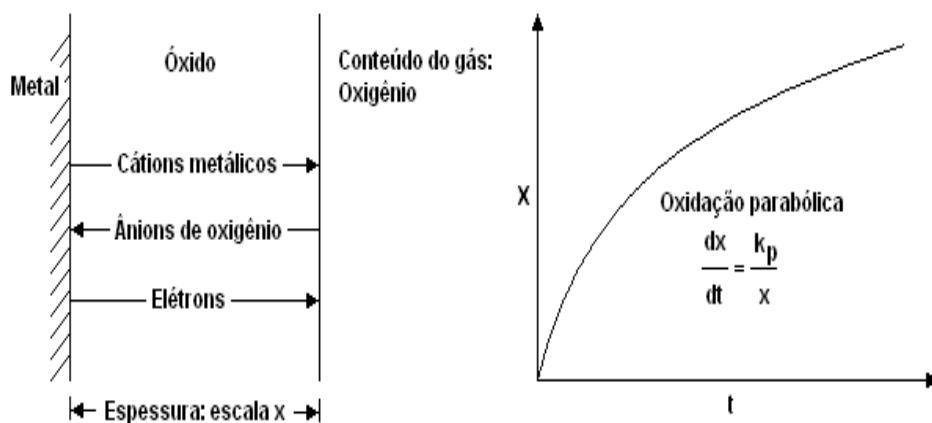


Figura 57 - Representação esquemática dos processos de transporte na escala durante o crescimento do óxido (SCHÜTZE, 2001).

Onde K_P representa a constante de crescimento de óxido.

2.13.3 Equação logarítmica

Nos casos em que a película formada é muito fina e pouco permeável, ou quando a oxidação ocorre a baixas temperaturas, verifica-se

$$\frac{dY}{dt} = \frac{K''}{t} \quad (\text{Eq. 17})$$

Integrando, tem-se a equação logarítmica.

$$Y = K'' \ln\left(\frac{t}{A} + 1\right) \quad (\text{Eq. 18})$$

Ocorre, geralmente, na oxidação inicial de muitos metais: Cu, Fe, Zn, Ni, Al. Aqueles que se oxidam rapidamente no início e depois lentamente, tornando-se a película praticamente constante, isto é, não aumenta de espessura.

2.14 Crescimento da Película de Óxido

O crescimento lento de óxidos indica valores baixos de K_p . Este é o caso quando os coeficientes de difusão dos íons são baixos. A migração dos íons é uma função da estequiometria do óxido (SCHÜTZE, 2001). Óxidos que apresentam um grau elevado de defeitos mostram taxas de crescimento mais elevadas que aqueles com menos concentração de defeitos na estequiometria. Taxas de crescimento de óxidos elevadas são encontradas consequentemente em estruturas altamente defeituosas, por exemplo, FeO. O crescimento rápido do CoO e do NiO é devido ao grande número de defeitos estequiométricos. Óxido de cromo (Cr_2O_3), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de silício (SiO_2) têm concentrações excepcionalmente baixa de defeitos. Os processos de difusão são extremamente lentos, assim, o crescimento da camada do óxido é lento.

A incorporação de íons na camada de óxido pode mudar a concentração de defeitos e a taxa de difusão. Por exemplo, cromo dissolvido em níquel aumenta o número de vacâncias aumentando desse modo a taxa de difusão e a taxa de oxidação (GRABKE, 1987).

Com baixa difusão no parâmetro de rede, por exemplo, Cr_2O_3 e Al_2O_3 , a difusão em torno do contorno de grão pode contribuir significativamente para o crescimento do óxido, especialmente quando o tamanho do grão é pequeno.

Neste caso também, dopagens com elementos estranhos influenciam o transporte no contorno de grão. Neste caso, o crescimento lateral do óxido deve ser mencionado, podendo aumentar em paralelo ao aumento de espessura. Aqui se considera que pelo menos um dos componentes (metal ou oxigênio) difunde preferencialmente ao longo do contorno de grão, enquanto o segundo componente é transportado na direção oposta. Algumas investigações mostram que dopagens com terras raras podem suprimir o crescimento lateral do óxido (SCHÜTZE, 2001).

2.15 Resistência a Impurezas

A contaminação da superfície dos materiais pode causar sérios problemas de corrosão, por poder causar a destruição da camada protetora de óxido (SCHÜTZE, 2001). Um exemplo é o caso de depósito da grafita em trincas de tubos em plantas de etileno (SWALES, 1980), conseqüentemente de atividades extremamente elevadas do carbono, de modo que a estabilidade do óxido já não pode ser garantida e a conservação por carbono torna-se possível. A deposição de grafita pode também ter efeitos de destruição mecânica devido ao fato de a grafita crescer nas rachaduras e nos poros da camada do óxido causando tensões.

Os processos de combustão em estações de energia usando combustíveis tais como: carvão, óleo e/ou gás de forno podem conduzir à precipitação de sulfatos ou depósitos ricos em vanádio. É importante salientar que os depósitos de sulfato em tubos superaquecidos ou em usinas podem ser líquidos acima da temperatura de 600 °C. O sulfato líquido contém íons livres (SO_3), que converte a camada protetora em sulfatos do metal. Em turbinas de gás a deposição de sulfatos alcalinos e das terras raras em processos ácidos ou básicos pode dissolver a superfície protetora (DE PLANQUE e SINGHEISER, L., 1987). Além disso, a presença dos vanádios aumenta a solubilidade das camadas do óxido ainda mais (RAPP, 1972). O Cr_2O_3 a altas temperaturas, abaixo de 850 °C apresenta uma resistência maior que o Al_2O_3 . Em temperaturas mais altas, ao contrário, o Al_2O_3 se mostra vantajoso, apesar

de ser mais sensível a atmosferas básicas. Em temperaturas acima de 950 °C a pressão de vapor de sulfatos alcalinos e de terras raras é alta o suficiente para evitar a condensação de tais impurezas (DE PLANQUE e SINGHEISER, L. 1987).

A contaminação em incineradores pode ser de tipos bastante diferentes. Consiste na maior parte de depósitos que contêm carbono, enxofre e/ou halogênios. Além dos mecanismos da destruição de camadas já mencionados, pode-se supor que em depósitos contendo cloreto, os danos à camada pela formação de cloretos metálicos podem gerar trincas no material.

2.16 Impermeabilidade a Componentes Agressivos

Um fator essencial para a ação protetora das camadas dos óxidos é que elas sejam impermeáveis aos elementos tais como: carbono (C), nitrogênio (N) e enxofre (S) que podem causar os danos materiais da corrosão interna. A solubilidade do carbono nos óxidos é extremamente pequena, de modo que a difusão volumétrica do carbono através de uma camada protetora intacta do óxido pode ser negligenciada (SCHÜTZE, 2001). Isto foi confirmado por meio de medidas de *radiotracer* nas ligas de alta temperatura e nas ligas experimentais, que formam camadas protetoras de Cr_2O_3 e de Al_2O_3 (GRABKE *et al*, 1989, WOLF *et al*, 1988). Pode-se supor também que as camadas densas são praticamente impermeáveis ao nitrogênio (GRABKE, 1989). A nitretação interna é observada somente quando há danos mecânicos com formação de trincas (SCHÜTZE, 2001). A solubilidade do enxofre em Cr_2O_3 é baixa (GRABKE, 1987), de modo que uma excelente proteção possa ser prevista por uma camada de óxidos livre de defeitos. Isto é confirmado pelos métodos de *radiotracer*, que mostram claramente que não há nenhum aumento de transporte de enxofre ao longo dos contornos de grão do óxido (GRABKE, 1987).

Deve-se mencionar que as camadas de Cr_2O_3 em atmosferas que contêm cloretos não fornecem praticamente nenhuma proteção, porque produtos voláteis de corrosão são formados pela reação com a camada,

conduzindo ao desenvolvimento de uma camada porosa (GRABKE, 1987). As camadas densas de Al_2O_3 parecem oferecer a melhor proteção neste caso (OH *et al*, 1986).

2.17 Desenvolvimento da Camada de Óxidos na Tecnologia de Altas Temperaturas

Para promover o desenvolvimento de camadas protetoras de óxido na superfície do material, a mistura relevante de materiais deve ser adicionada durante os processos de produção. A mistura mais importante de elementos é a conexão de Cr e Al. Em alguns casos Si é também importante. Frequentemente outros elementos, incluindo componentes de base, são incorporados na camada de superfície. Em materiais tecnológicos, frequentemente as camadas consistem de várias fases com componentes de camadas de várias composições. A distribuição delas depois de longos períodos de tempo é determinada por estabilidade e pelo gradiente da pressão parcial do oxigênio acima de toda camada.

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta capítulo são descritos as materiais pesquisados, os métodos experimentais e as principais técnicas de análise microestrutural, empregado neste trabalho.

3.1 Materiais

3.1.1 Chapa de Aço ASTM A285C

O material em estudo são amostras de chapas de aço ASTM A285C (figura 58) coletada da carcaça spray do forno fusão a arco. Foram coletadas 2 amostras da região com maior deformação mecânica.



Figura 58 – Foto da Carcaça spray e amostra de chapa metálica

O aço ASTM A285C faz parte dos aços carbonos, é um dos aços mais utilizado, devido a sua baixa temperabilidade, excelente forjabilidade e soldabilidade, porém sua usinagem é relativamente pobre. Este tipo de aço pode ser aplicado em cementação com excelente relação custo benefício comparado com aços utilizados para o mesmo propósito. A microestrutura presente neste aço no seu estado normalizado é perlita fina e ferrita. A (figura 59) representa a composição química do aço ASTM A285C. Este aço tem limites de contaminantes conforme segue.

$$\text{Cu} + \text{Ni} + \text{Mo} \geq 1$$

$$\text{Cr} + \text{Mo} \geq 0,32$$

ASTM A285C	C	Mn	P	Cu	Cr	Ni	Mo
Mínimo	-	-	-				
Máximo	0,28	0,90	0,035	0,400	0,300	0,400	0,120

Figura 59 - Especificação química do aço ASTM A285C.

A (figura 60) demonstra desenho técnico da chapa metálica do Forno, especificando o material empregado na confecção e reparos da carcaça spray.

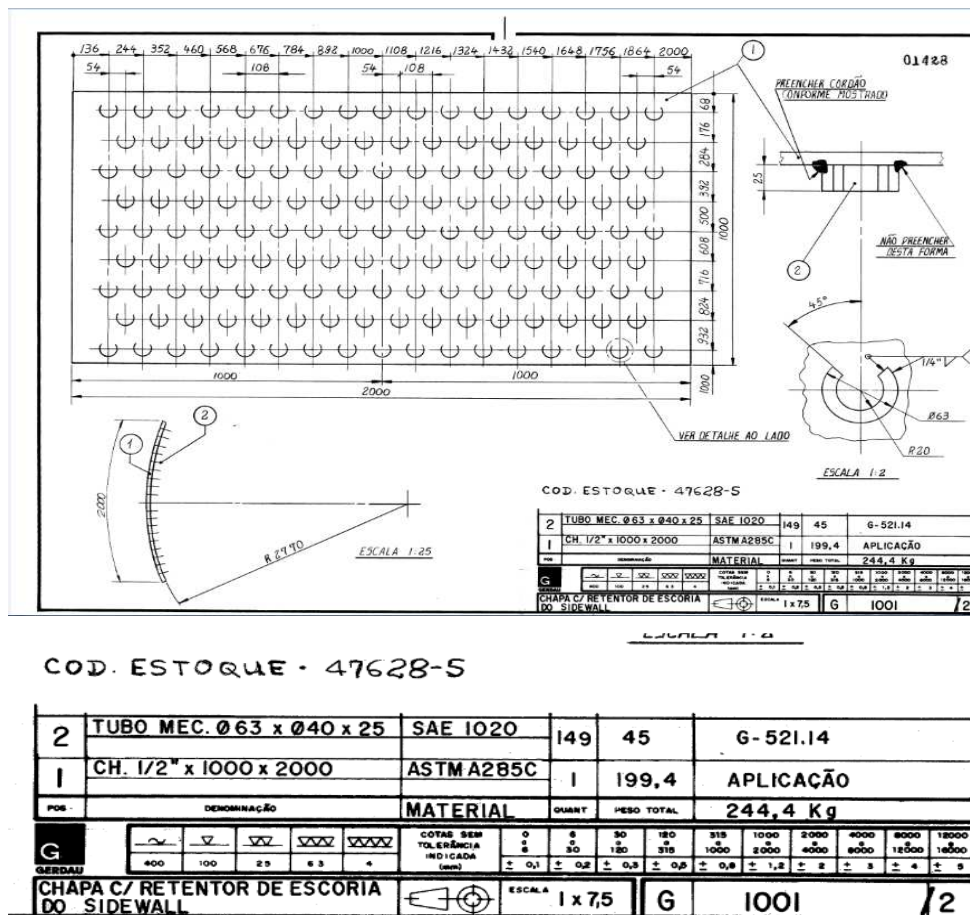


Figura 60 - Desenho mecânico chapa da carcaça Spray

3.1.2 Reagentes

No presente trabalho foram utilizados reagentes buscando atacar quimicamente a superfície das amostras para que fosse possível sua análise em microscópio ótico. Os reagentes utilizados estão listados na (figura 61) assim como sua composição química e o método de ataque.

Reagente	Composição	PROCEDIMENTO	Comentários
Nital 2%	HNO ₃ 2ml Álcool etílico.... 98ml	Revela bem os contornos de grão da ferrita. Tempo de ataque de segundos a 1 minuto.	Revela contorno de grão da ferrita, contraste entre perlita, ferrita e cementita. Diferencia a ferrita da martensita.
Metabissulfeto de Sódio	Na ₂ S ₂ O ₅ 8g H ₂ O dest. 100ml	Similar ao Picral. Tempo de ataque: poucos segundos a 1 minuto.	Revela martensitas escuras em aços revenidos.
Cloreto férrico	FeCl ₂ 5g HCl100ml H ₂ O dest. 100ml	Imersão até revelar a estrutura.	Revela a austenita em aços inoxidáveis e ao Ni.
Camada de Óxidos	H ₂ SeO ₄ 2,5ml HCl 20ml Álcool etílico... 480ml	Aquecer o Ácido selênico antes do uso. Imersão da amostra a temperatura ambiente de 30 a 45 segundos.	Revela as fases de Fe ₂ O ₃ (hematita), Fe ₃ O ₄ (magnetita) e FeO (wustita).
Reativo Crômico (Cromato Alcalino)	CrO ₃ 16,0g H ₂ O dest.... 145ml NaOH 80g	Dissolver o ácido crômico em água destilada, adicionar o hidróxido de sódio evitando aquecimento excessivo. Aquecer em chapa elétrica até 120°C. Imergir a amostra na solução.	Evidencia a origem dos defeitos superficiais, por ataque de regiões ricas em oxigênio clareando-as.
Dicromato de Potássio	K ₂ Cr ₂ O ₇1,0g H ₂ SO ₄4ml H ₂ O.....50ml HCl...2 gotas antes do uso.	-----	Revela o contornos dos grãos de cobre e algumas ligas de cobre.
Hidroxido de amonio com peroxido de hidrogênio	NH ₄ OH.....25ml H ₂ O ₂50ml 3% H ₂ O.....25ml	-----	Revela o contornos dos grãos de cobre e algumas ligas de cobre.
Ácido Oxalico	Ácido Oxalico.....10g H ₂ O.....100ml	Imersão até revelar a estrutura.	Revela o contorno de grão em alguns aços inoxidáveis.
Glyceregia	HNO ₃ 10ml HCl 20-30ml Glicerol.....20ml	Imersão até revelar a estrutura.	Revela o contorno de grão em alguns aços inoxidáveis.

Figura 61 - Tabela de reagentes químicos

3.1.3 Amostra de Escória da Carcaça Spray

A amostra de escória (figura 62) em estudo foi coletada da carcaça spray próxima a região dos injetores de oxigênio. Para coletar a amostra foi necessário interromper a operação do forno e aguardar o resfriamento por um período de seis horas.



Figura 62 - Foto da amostra de escória retirado da carcaça spray região do Cojet

3.1.4 Amostra de Aço no forno elétrico a arco

A amostra de aço (figura 63) em estudo foi coletada ao termino do refino no forno fusão a arco, temperatura medida 1630 °C. Para coletar a amostra foi utilizado robô acessar o interior do forno e amostrador específico para coletar aço líquido no refino primário.



Figura 63 - Foto da amostra de aço coletada após refino primário no forno elétrico a arco

3.2 Equipamentos

3.2.1 Desbastes das Amostras

Para a análise da composição química, da dureza (HV) e da textura, ao longo da espessura, foram desbastadas as amostras com uma serra fita (figura 64) com refrigeração a base de água e óleo para evitar o aquecimento excessivo da peça.



Figura 64 - Máquina de corte Serra fita

3.2.2 Corte da Amostra

Foi utilizado no presente trabalho foi utilizada o equipamento de corte metalográfico *cutoff* – COR80 (figura 65). A amostra foi devidamente refrigerada buscando diminuir a possibilidade de transformações metalúrgicas na superfície da amostra.



Figura 65 - Equipamento de corte cutoff – COR80 – Fabricante Arotec

Fonte: Catálogo de Equipamentos Arotec. (AROTEC, 2013)

3.2.3 Lixamento e Polimento

Nas etapas de lixamento foi utilizada água como fluido lubrificante, já nas etapas de polimento foi utilizado álcool etílico absoluto. No procedimento de preparação de superfície foi utilizada lixadeira e politriz do modelo Aropol da Arotec (figura 66).



Figura 66 - Lixadeira e Politriz – Arotec Modelo Aropol

3.2.4 Aquisição de imagens

Foi utilizado para aquisição de imagens o microscópio ótico de base invertida da fabricante *Olympus* modelo *CKX41* e microscópio eletrônico de varredura **JEOL JSM-6390LV** (figura 67).



Figura 67 - Microscópio ótico e eletrônico de varredura

3.2.5 Espectrômetro Óptico

Foi utilizado para realizar análise química Espectrômetro de emissão óptica (OES) ARL 3460 Advantage (figura 68).



Figura 68 - Espectrômetro de emissão óptica (OES) ARL 3460

3.3 Métodos

3.3.1 Procedimento de Cortes das Amostras

A metodologia utilizada para o corte das amostras do aço ASTM A285C foi com policorte *Cutoff* que possui refrigeração da amostra por meio de uma mistura de água e óleo sintético, essa mistura evita um aquecimento excessivo da peça, diminuindo o atrito entre a peça e a ferramenta de corte e ainda limpando a peça durante o corte.

Dependendo da região de interesse e do objetivo de análise, pode-se efetuar a retirada das amostras nos planos: longitudinais, transversais ou planar.

O material inicial se encontrava no formato de chapas. Primeiramente foram cortadas amostras de secções transversais e longitudinais. Estas amostras tiveram todas as suas faces levemente lixadas com granulação #320, para limpeza e melhor adesão no embutimento posterior.

3.3.2 Embutimento a Quente

A amostra foi embutida em materiais termoplásticos por meio de prensas, utilizando-se pressão e aquecimento para efetuar a polimerização.

O método consiste em colocar o corpo de prova com a face que se quer analisar em contato com o êmbolo inferior da máquina de embutimento.

Após apertar o êmbolo, coloca-se a resina na câmara de embutimento pressionando-a por um determinado tempo, de acordo com o plástico utilizado, de acordo com a (figura 69).

Tipo de Plástico	Cor	N.º de Medidas	Pressão (Kgf/mm ²)	Tempo de Aquecimento (min)	Tempo de Resfriamento (min)
Baquelite	Preta	2 a 5	125 a 150	10	5
Lucite	Transparente	2 a 5	125 a 150	8	4

Figura 69 - Parâmetros para embutimento a quente, na prensa hidráulica do laboratório.

Os corpos-de-prova metalográficos, depois de embutidos e identificados foram lixados com granulações #220, #320 e #500, para em seguida serem polidos utilizando-se pasta de diamante de diâmetros 6 mm, 3 mm, e 1 mm

3.3.3 Análise Química

As análises química foram realizadas seguindo o procedimento inicial de verificação do espectrômetro com um padrão primário com composição próxima ao material a se analisado.

Durante a verificação foram realizadas duas análises no padrão para garantir o resultado.

3.3.4 Análise de Volume Finito

Análise de volume finito realizado para determinar pontos com maior aporte de calor na carcaça spray, utilizando software ANSYS CFX para simulação de um spray modelo HH40W operando com 0,530 kg/s.

4. RESULTADOS

4.1 Composição Química da chapa metálica da carcaça spray

A análise química realizadas propiciou o conhecimento específico do ponto de vista da composição do aço analisado.

- Amostra coletada no painel dois (P2) da carcaça spray localizada no abaixo do cojet 2 (figura 70).



Figura 70 - Amostra de aço ASTM A285C carcaça Spray P2

AMOSTRA	C	Mn	Si	S	P	Cu	Cr	Ni	Mo	As	Sn
P2 BAIXO	0,134	0,877	0,239	0,011	0,016	0,005	0,018	0,011	0,000	0,003	0,001
	Nb	Ti	V	W	B	Ca	Al	Pb	N	Ceq	Zn
	0,001	0,002	0,005	0,002	0,000	0,000	0,044	0,000	83,6	0,274	0,001

- Amostra coletada no painel superior (SP1) região da bica de vazamento painel superior 1 (figura 71).

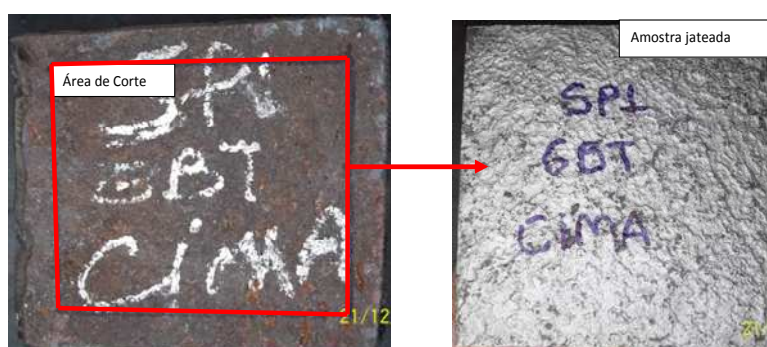


Figura 71 - Amostra de aço ASTM A285C carcaça Spray SP1 superior

AMOSTRA	C	Mn	Si	S	P	Cu	Cr	Ni	Mo	As	Sn
SP1 EBT CIMA	0,130	0,876	0,240	0,011	0,016	0,006	0,018	0,011	0,000	0,003	0,001
	Nb	Ti	V	W	B	Ca	Al	Pb	N	Ceq	Zn
	0,002	0,002	0,005	0,003	0,000	0,000	0,045	0,000	70,4	0,270	0,001

A (figura 72) apresenta a especificação química conforme norma do aço ASTM A285C.

ASTM A285C	C	Mn	P	Cu	Cr	Ni	Mo
Mínimo	-	-	-				
Máximo	0,28	0,90	0,035	0,400	0,300	0,400	0,120

Figura 72 - Composição química do aço ASTM A285C

Através da análise química pode-se concluir que o aço utilizado na fabricação da carcaça spray não corresponder ao aço ASTM A285C. Observa-se diferença considerável do Carbono encontrado nas amostras analisadas da carcaça spray, sendo carbono médio 0,139%, quando comparado com o percentual especificado na norma (figura 66). Somente o manganês (0,87%) esta próximo ao especificado na norma ASTM A285C. Os demais elementos como Cobre, Cromo, Níquel e Molibdênio atendem o especificado, porém, os valores apresentados são baixos sendo um forte indicativo que o aço utilizado na fabricação da carcaça spray foi obtido pelo processo de alto forno que utiliza minério de ferro com baixíssimos teores de contaminantes como matéria prima.

4.2 Análises Metalográfica da chapa metálica da carcaça spray

A variação dos ciclos térmicos pode modificar em maior ou menor escala a estrutura dos materiais. Como consequência há possibilidade alteração de suas propriedades mecânica e condutividade térmica. Para tanto, foram verificadas as condições superficiais e da microestrutura de cada “Amostra” de chapa do forno elétrico a arco.

Foi seccionado um corpo de prova na transversal de cada “Amostra”, a fim de comparar a micrografia destes pontos distintos com a possível influência de elementos contaminantes da carga metálica do processo de fusão e refino, na sua microestrutura (figura 73).



Figura 73 - Carcaça spray região do FEA Painei 2 parte superior

A (figura 74) apresenta a microscopia da chapa de aço ASTM A285C sem tratamento térmico. O corpo de prova foi retirado da chapa de aço nova, sem utilização.

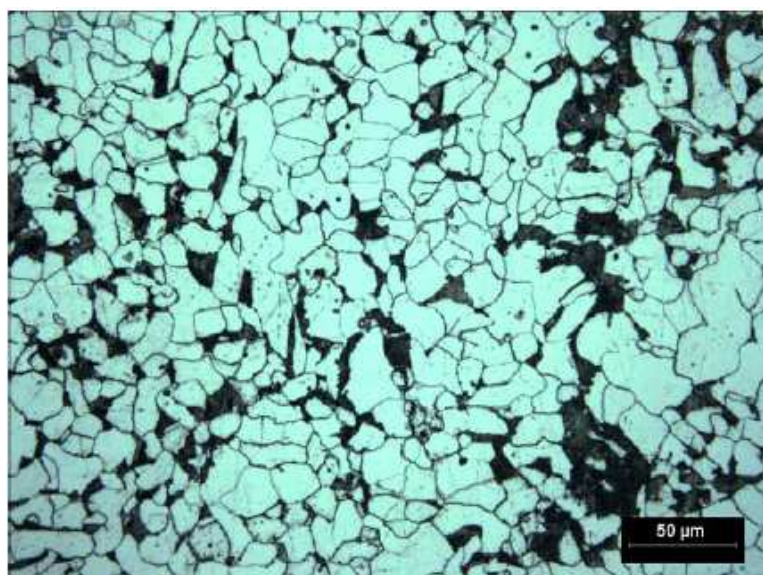


Figura 74 - Microestrutura do metal base sem tratamento térmico. Ataque Nital 2%.

O corpo de prova embutido representa a espessura da chapa, sendo possível desta forma caracterizar as superfícies da chapa e a região central. Abaixo segue o perfil microestrutural registrado no corpo de prova.

A análise da amostra Lateral da chapa do forno fusão a arco mostra que os dois corpos de prova retirados há uma microestrutura semelhante entre si – (figura 75). Nestas amostras observa-se evidencias de possível encruamento no material devido ao alongamento dos grãos de ferrita e perlita.

Pode-se verificar na (figura 69) uma estrutura típica de aços baixo carbono, onde ha ferrita bem definida equiaxial (79,58%) com presença de perlita (20,42%) na estrutura.

Não se observa descarbonetação superficial em nenhum dos corpos de prova analisados.

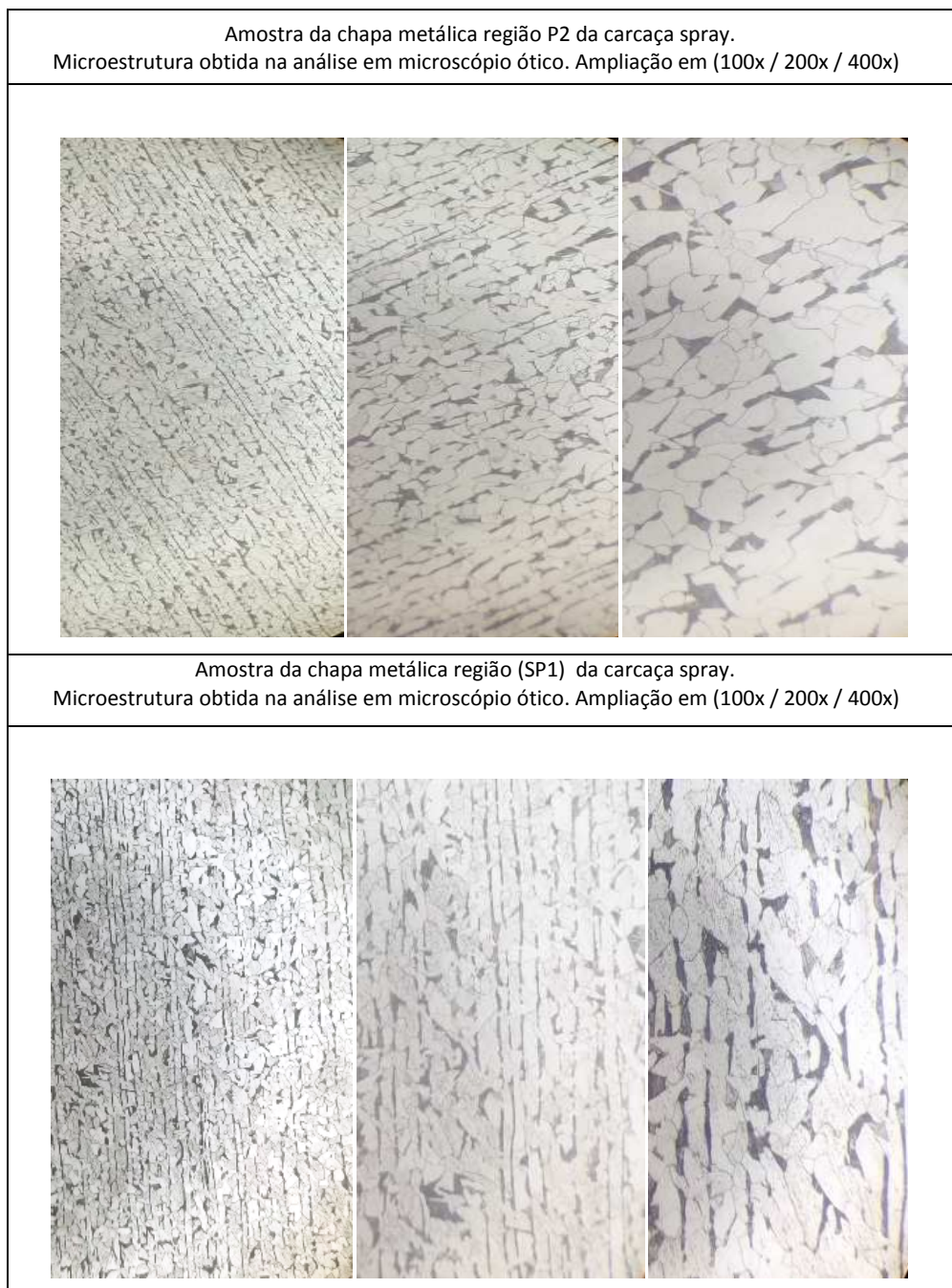


Figura 75 - Imagens de microscopia das amostras de P2 e SP1 da carcaça spray

É possível verificar na (figura 76) bandas de laminação devido à variação de manganês e silício na composição durante o processo de lingotamento.

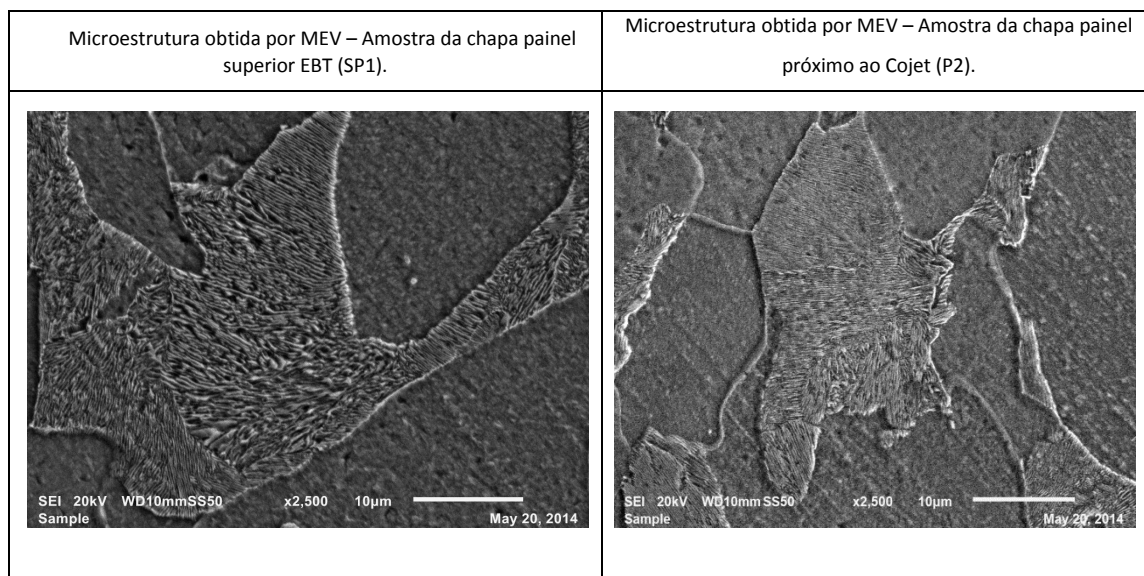


Figura 76 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra SP1 e P2 com aumento de 2500 vezes.

Através desta análise é possível afirmar que não houve transformações microestruturais relevante para causar falha do material.

4.3 Discussão de Resultados MEV – EDS

Com a finalidade de confirmação da caracterização das fases presentes, foram feitas análises complementares no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). As fases foram também caracterizadas utilizando-se a análise de energia dispersiva por raios-X (EDS). A (figuras 71 e 72) apresentam a microestrutura de uma região da amostra painel superior (SP1) e painel próximo ao injetor de oxigênio (P2).

Pode-se observar nessas micrografias (figuras 77 e 78) formação de grãos de ferrita de forma poligonal característico de aço com manganês maior que 0,80%. O manganês combina primeiro com enxofre para formar MnS e o excedente liga-se em parte ao carbono dando Mn_3C , composto análogo a

cementita (Fe_3C) à qual se associa, e em parte se difunde na ferrita (Colpaert, 1957).

Não se observa evidência de processo de deformação mecânica das estruturas componentes do material. Esse resultado indica a não influência de variáveis do ciclo térmico na falha observada na chapa metálica da carcaça spray.

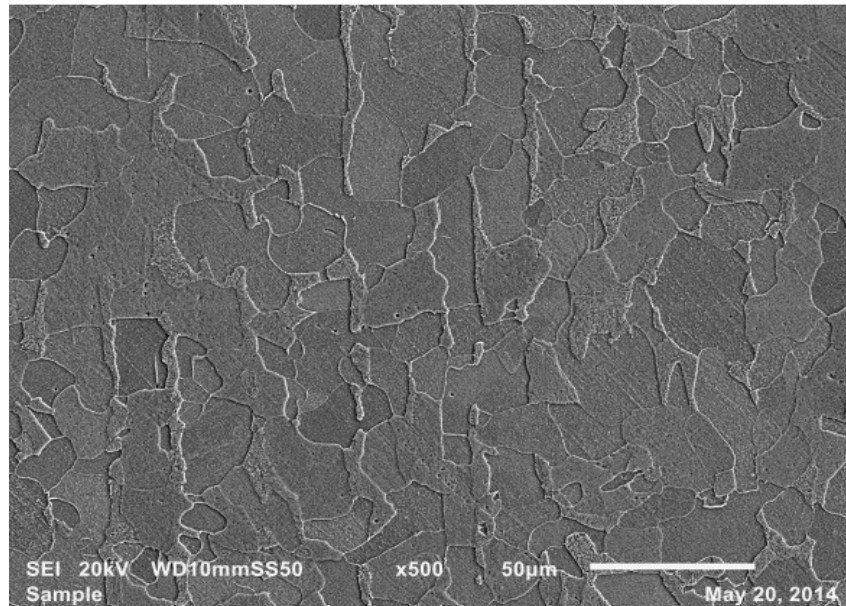


Figura 77 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra painel superior (SP1) com aumento de 500 vezes.

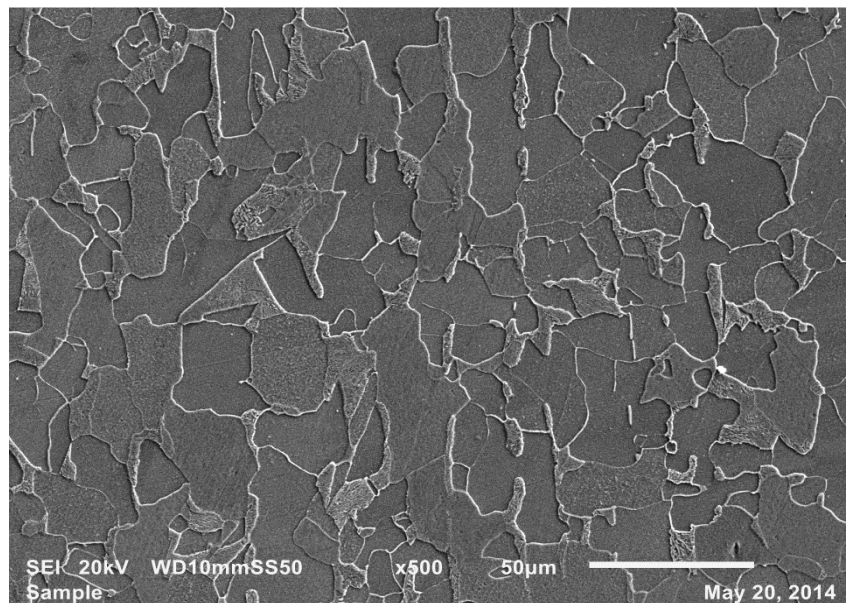


Figura 78 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da amostra painel próxima ao injetor de oxigênio (P2) com aumento de 500 vezes.

Através da análise de EDS (figura 79 e 80) realizada na região da borda da chapa face quente e fria, também na chapa sem utilização (figura 77), não foi observado formação de fases contendo sulfetos, evidenciando a não influencia dos elementos de carga metálica na microestrutura do material.

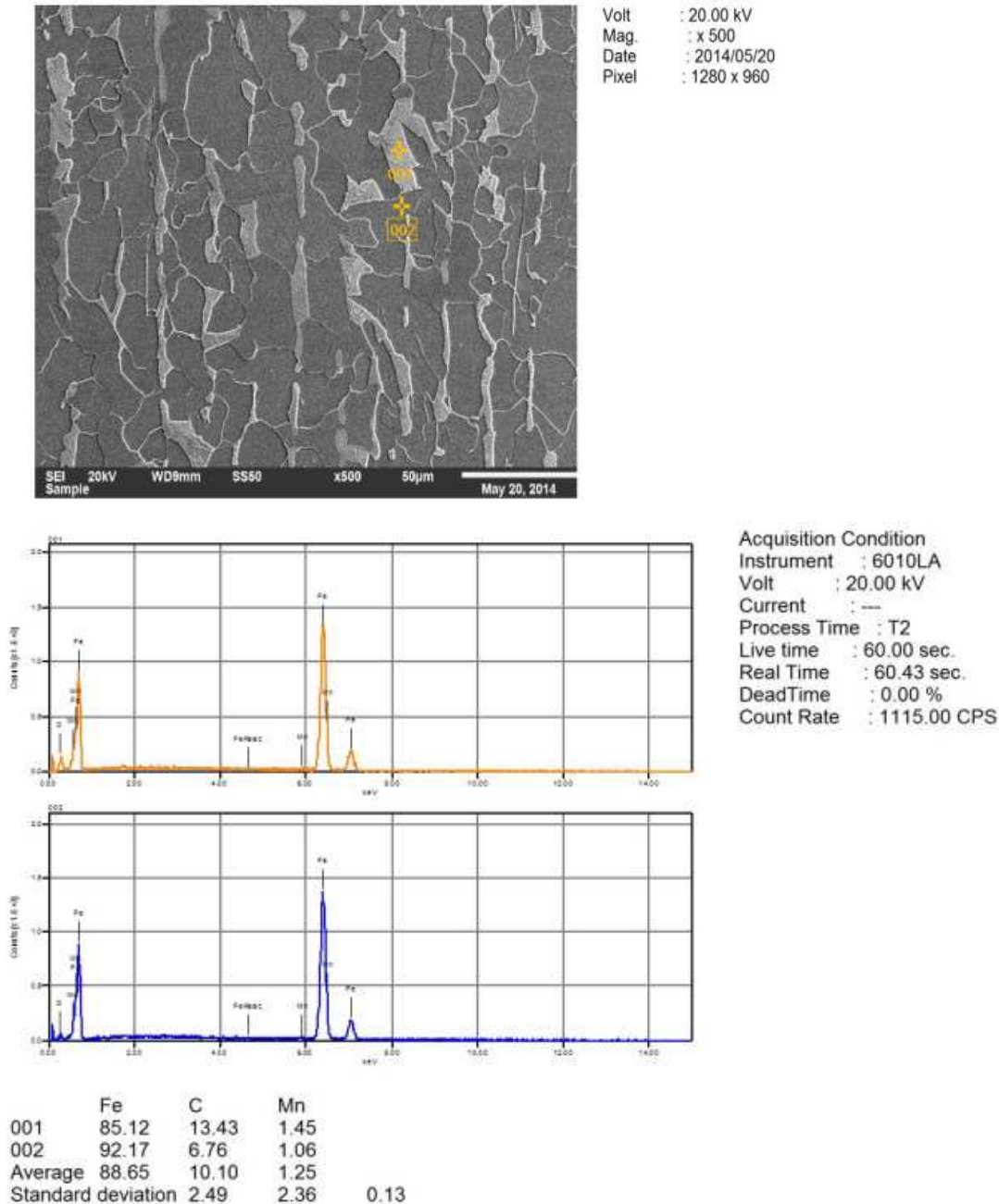
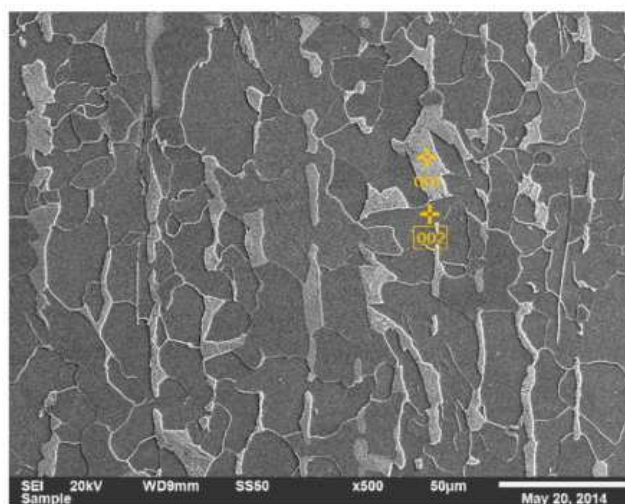
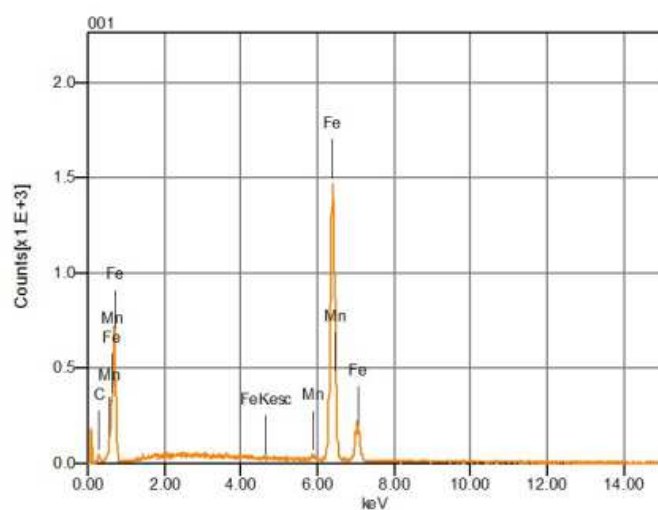


Figura 79 - EDS da chapa do painel P2 próximo ao injetor de oxigênio, região da borda face quente.



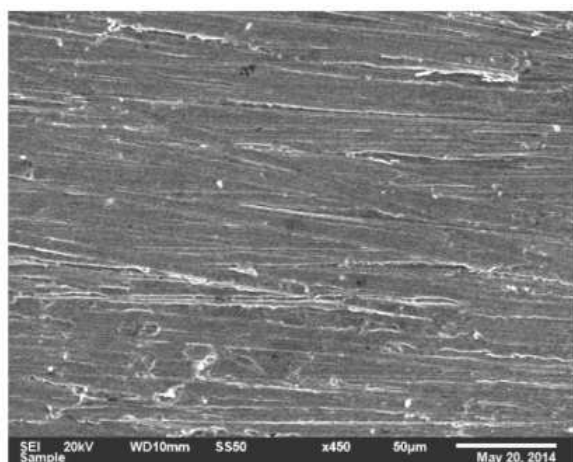
Volt : 20.00 kV
Mag. : x 500
Date : 2014/05/20
Pixel : 1280 x 960



Acquisition Condition
Instrument : 6010LA
Volt : 20.00 kV
Current : ---
Process Time : T2
Live time : 60.00 sec.
Real Time : 60.46 sec.
DeadTime : 1.00 %
Count Rate : 1137.00 CPS

Chemical formula	ms%	mol%	Sigma	Net	K ratio	Line
C	4.37	17.52	0.10	839	0.0003439	K
Mn	1.44	1.26	0.20	1756	0.0027066	K
Fe	94.19	81.22	0.21	101783	0.1814885	K
Total	100.00	100.00				

Figura 80 - EDS da chapa do painel P2 próximo ao injetor de oxigênio, região da borda face fria.



Volt : 20.00 kV
Mag. : x 450
Date : 2014/05/20
Pixel : 640 x 480

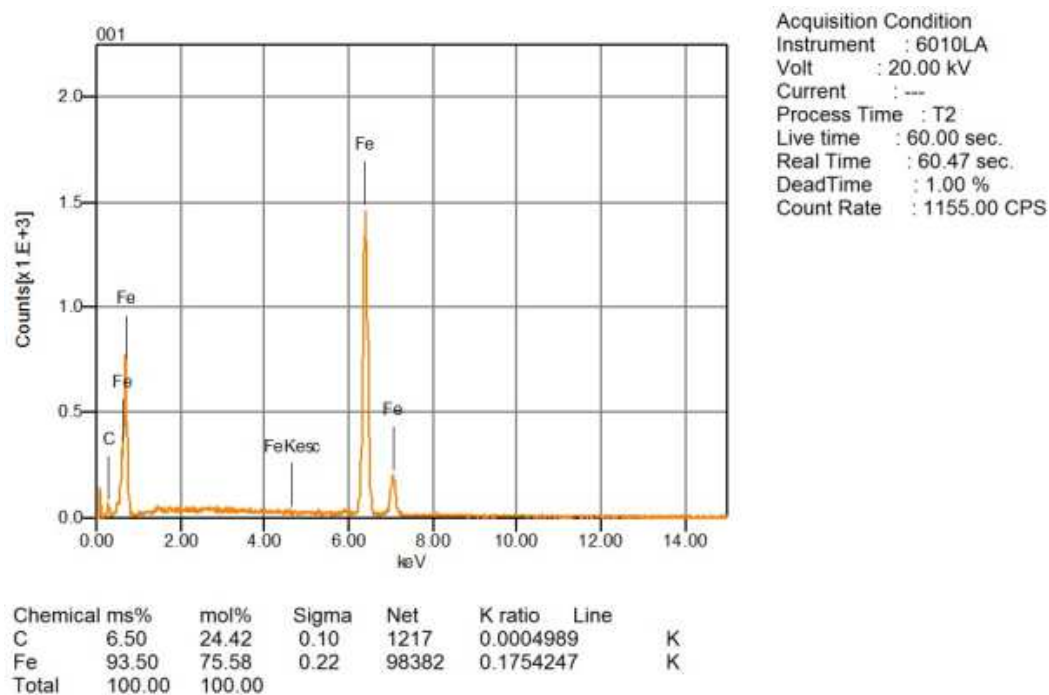


Figura 81 - EDS da chapa nova, sem utilização.

4.4 Ensaios de Tração e Microdureza da chapa metálica da carcaça spray

As (figuras 82 e 83) respectivamente apresentam o resultado do ensaio de tração e microdureza realizado nas amostras P2 (painel próximo ao injetor de oxigênio) e SP1 (painel superior próximo a bica de vazamento), ambos resultados não apresentaram nenhuma característica fora da especificação da norma ASTM A285C. Esse resultado indica as propriedades de resistência mecânica e de tenacidade não devem ter sofrido alteração significativa durante o processo de operação do forno.

Amostra	Peso (g)	Comp. (mm)	M.L.	So (mm ²)	Fe (N)	Le (N/mm ²)	Fr (N)	Lr (N/mm ²)	Lr/Le	Lo (mm)	Lf (mm)	A (%)
Amostra	167,1	260	0,643	81,87	23125	282	34113	417	1,48	100	113	13
Painel	186,7	260	0,718	91,47	25513	279	38470	421	1,51	100	112	12
superior	163,2	260	0,628	79,96	24089	301	33198	415	1,38	100	111	11

Figura 82 - Resultado ensaio de tração realizado na chapa da carcaça spray

Observações:

So = Seção transversal da barra (mm²)

ML = Massa linear da barra (kg/m).

Fe = (Força de escoamento) - Carga máxima aplicada sobre a seção transversal até início da deformação plástica.

Fr = (Força de resistência) - Carga máxima aplicada sobre a seção transversal até a ruptura.

Le = (Limite de escoamento) - Tensão máxima aplicada na seção transversal (N/mm²) no início da deformação plástica.

Lr = (Limite de resistência) - Tensão máxima aplicada na seção transversal (N/mm²).

A = Alongamento após ruptura da barra.

A (figura 82) apresenta o resultado do ensaio de dureza da chapa metálica das amostras P2 (painel próximo ao injetor de oxigênio) e SP1 (painel superior próximo à bica de vazamento).

Perfil de dureza HRB	Pontos	Amostra P2			Amostra SP1		
		CP "A"	CP "B"	CP "C"	CP "A"	CP "B"	CP "C"
	1	65,4	60,9	70,5	69,8	70,5	69,4
	2	71,3	70,3	71,3	70,3	70,4	71,1
	3	71,4	70,2	68,8	71,3	66,7	69,0
	4	77,9	70,3	70,8	71,2	69,0	70,7
	5	79,5	74,6	72,8	71,8	68,7	70,9
	Média	73,1	69,3	70,8	70,9	69,1	70,2
	Desvio	4,48	3,344	0,968	0,664	1,112	0,816

Figura 83 - Tabela de resultado da análise de microdureza das amostras P2 e SP1.

4.5 Análise Química do Aço Processado no Forno Fusão

Foram realizadas cinco análises químicas conforme (figura 84), elas propiciaram o conhecimento específico do aço produzido no forno fusão a arco, sua característica e elementos químicos oriundo da carga metálica utilizada como matéria prima na fabricação de aço. Observa-se que o carbono final após o sopro de oxigênio tem pouca variação, isto se deve pelo controle estequiométrico existente no processo. Demais elementos como fósforo, silício, enxofre e cobre não apresentaram variação significantes.

Amostras	C	Mn	Si	S	P	Cu	Cr	Ni	Mo	Sn	Nb	N2	Al	Pb
1	0,079	0,043	0,005	0,040	0,012	0,294	0,088	0,071	0,013	0,023	0,002	54,022	0,639	0,002
2	0,084	0,035	0,007	0,051	0,010	0,314	0,062	0,086	0,015	0,024	0,001	43,116	0,769	0,001
3	0,063	0,034	0,005	0,054	0,011	0,314	0,060	0,074	0,015	0,024	0,002	47,076	0,372	0,002
4	0,075	0,043	0,006	0,061	0,014	0,317	0,082	0,066	0,014	0,022	0,002	44,854	0,622	0,002
5	0,080	0,082	0,006	0,058	0,036	0,302	0,139	0,079	0,015	0,023	0,003	40,295	0,627	0,002

Figura 84 - Análise química das amostras coletadas durante o processo de fusão e refino no forno fusão a arco.

4.6 Análise Química da Escória da Carcaça Spray

Análise química da escória (figura 85) apresenta elevado índice de óxido de ferro (44,89%), provavelmente derivado da queima do ferro pelo oxigênio aportado através da energia química. Não foi evidenciada concentração elevada de enxofre na escória.

Al ₂ O ₃	CaO	Cr ₂ O ₃	FeO	MgO	MnO	P ₂ O ₅	S	SiO ₂	TiO ₂	% Fe Gotas
7,48	18,88	2,02	44,89	8,54	4,03	0,38	0,047	12,62	1,23	20,14

Figura 85 - Análise química da escória coletada na carcaça spray do forno ao término da corrida.

4.7 Análise Qualidade da Água de Resfriamento

O resultado das análises da água de refrigeração da carcaça spray apresentaram duas características fora da especificação definida pelo fabricante (figura 86). Observa-se que a quantidade de sólidos suspensos está muito acima do especificado, apesar disso, não foi possível afirmar que a falha encontrada na chapa metálica tem relação direta, pois não foi encontrado material depositado na chapa.

PARÂMETROS	MÍN.	MÁX.	20/mar	27/mar	03/abr	10/abr
pH	6,5	7,5	6,82	6,7	6,8	6,92
Cloretos	0	20	14	18,2	17,5	17,5
Condutividade	0	500	214,4	231	232,2	259,3
Sólidos Suspensos	0	3	6	5	10	9
Turbidez	0	5	8	7	14	3

Figura 86 - Resultado analítico da qualidade da água de refrigeração da carcaça spray

4.8 Perfil da Temperatura Carcaça Spray

Foi instalado sensor de temperatura na carcaça spray na região dos injetores de oxigênio com a finalidade de analisar o perfil térmico da chapa metálica durante o processo de fusão e refino. A temperatura máxima observada foi 81 °C no início do refino do aço (figura 87). Entende-se que o acréscimo na temperatura da chapa ocorreu devido ao aumento do aporte de energia química durante a etapa de refino, foram injetado coque 20 kg/minuto e elevado a vazão de oxigênio para 3800 m³/hora.

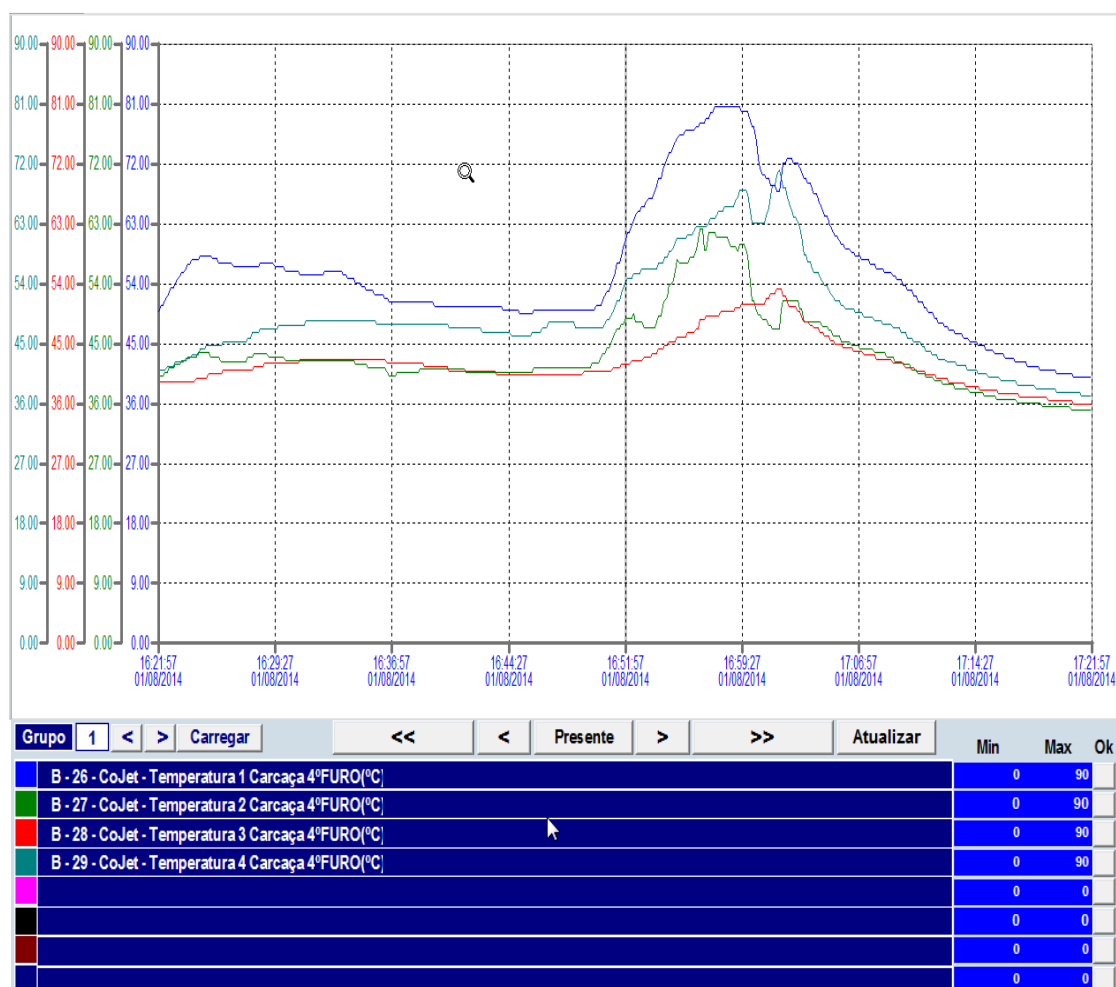


Figura 87 - Gráfico de temperatura da carcaça spray na região do injetor de oxigênio do quarto furo

Com a finalidade de averiguar a temperatura gerada pelas energias na atmosfera do forno, foi instalado sensor de temperatura na entrada do sistema responsável pela exaustão do pó e gases gerados no processo do forno. Foi possível analisar que existe correlação direta entre o aumento da temperatura

da carcaça (chapa metálica), saída dos gases e pó versus aumento do aporte de oxigênio no forno. Maior temperatura encontrada foi 590 °C no mesmo instante que inicio a injeção máxima (3800 m³/h) de oxigênio pelos três cojets (principal 1, 2, e 3). A temperatura refira esta expressa como TE113, esta é a nomenclatura dada ao sensor citada na legenda do gráfico (figura 88).

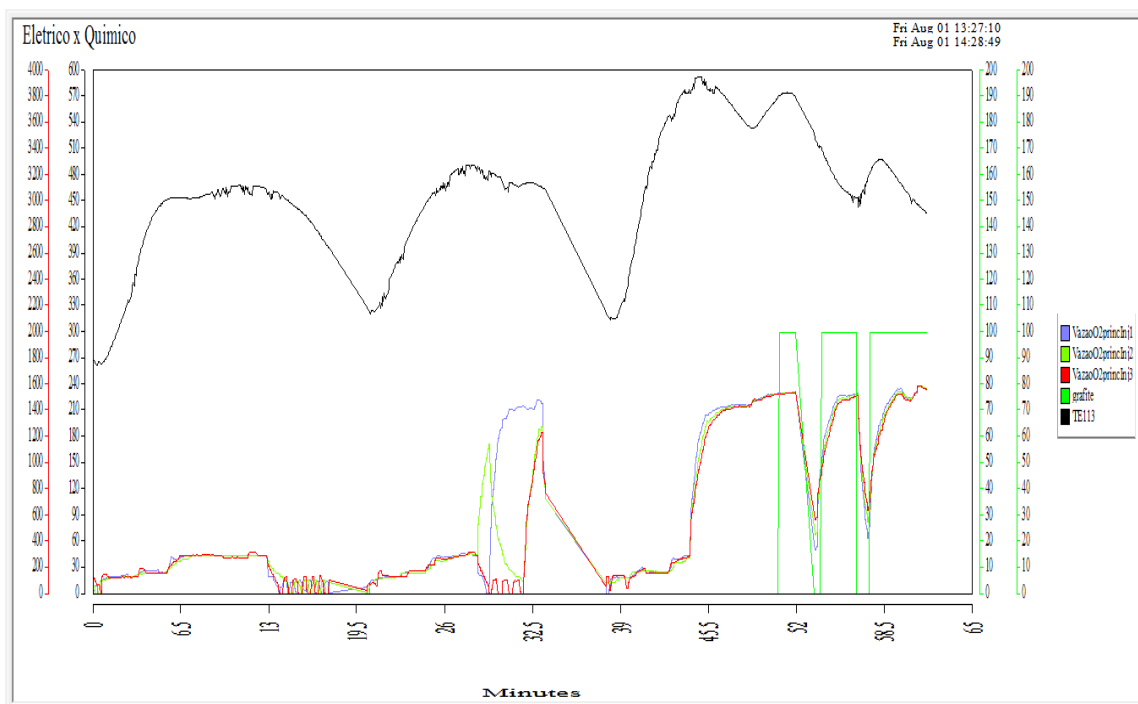


Figura 88 - Gráfico referente à energia química do forno elétrico a arco.

4.9 Simulação Numérica por Volume Finito

Mediante ao aporte de energias no FEA para acelerar a fusão da sucata, obtêm-se elevada temperatura na atmosfera do forno, com isto o sistema de refrigeração é muito solicitado.

Para entender o resultado teremos breve explanação do problema estudado. Ao carregar o forno com sucata a mesma acomoda-se a frente do queimador. Quando a chama é elevada para potências maiores, a mesma choca-se com a sucata e então retorna para as laterais e contra o bloco e painel.

Normalmente há uma carga térmica proveniente do forno, composta de radiação e convecção de materiais projetados internamente, quando somado

ao fluxo de calor proveniente do rebote da chama, torna-se impossível de ser removido pelo sistema de refrigeração (figura 89).

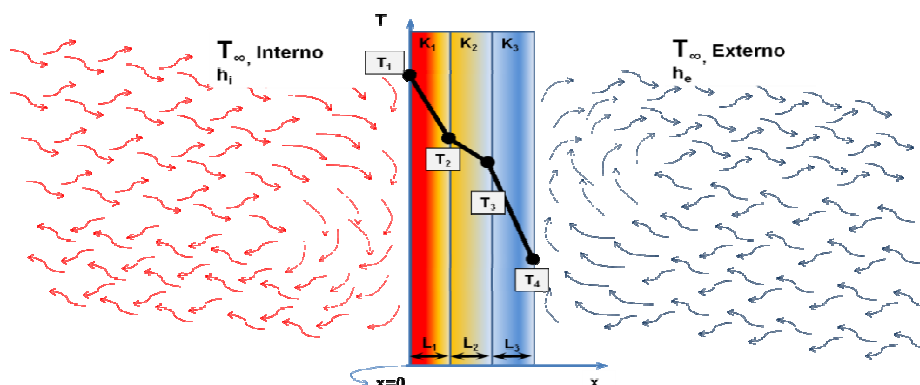


Figura 89 - Ilustração do Sistema de refrigeração da carcaça spray

A convecção gerada pelos gases quentes oriundos do queimador eleva a convecção interna do forno. Estes gases chegam a temperaturas de 3000°C e velocidades de 400 m/s na saída do injetor. Ao chocar-se com a sucata certamente a velocidade e temperatura caem, e a medida que se afasta diminui-se progressivamente, até atingir o painel. Há uma relação direta entre velocidade (relação de Nusselt) com o coeficiente de convecção que é proporcional ao fluxo de calor (figura 90).

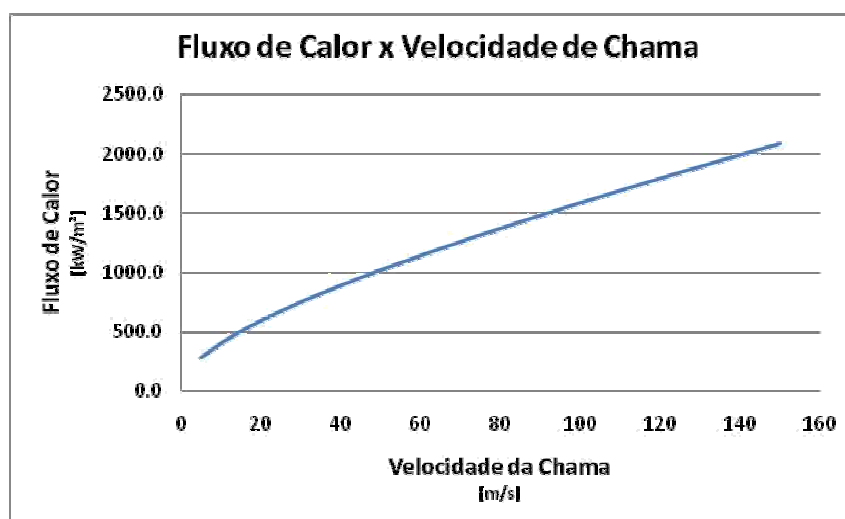


Figura 90 - Gráfico do Fluxo de calor x Velocidade da Chama

O processo de extração de calor via spray possui alguns fenômenos que analiticamente seriam impossíveis de ser quantificados (figura 91), para

contornar esta situação foi utilizado o software ANSYS CFX para simulação de um spray modelo HH40W operando com 0,530 kg/s.

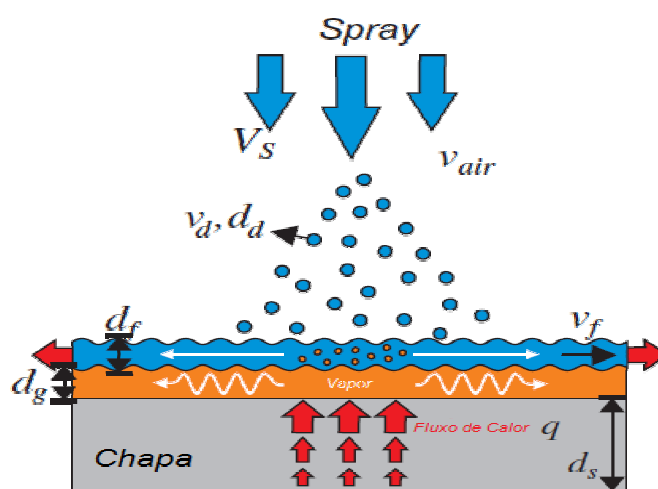


Figura 91 - Ilustração sobre a dissipação de calor na chapa da carcaça spray

Através da simulação foi possível definir a velocidade da água formando a lâmina na carcaça spray na região próxima ao queimador e injetor de oxigênio (figura 92).

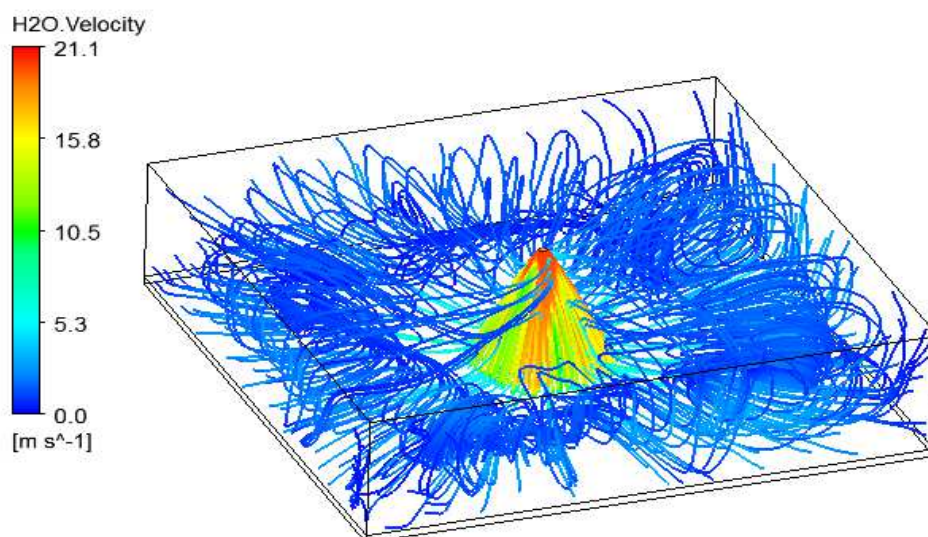


Figura 92 - Gráfico simulando a velocidade das gotículas de água na carcaça spray.

Pelo coeficiente de calor, observa-se que quanto menor a velocidade de chama, menor será o aporte térmico gerado no painel (figura 93).

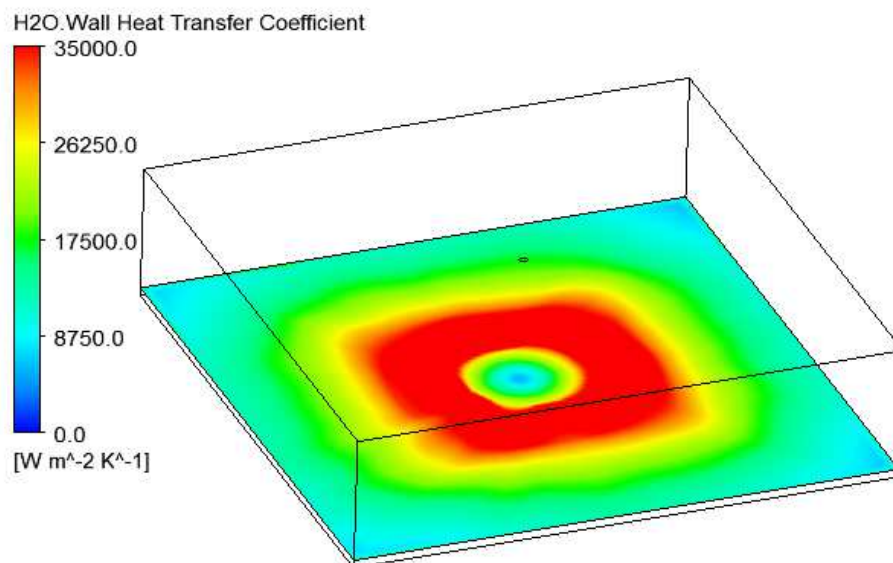


Figura 93 - Gráfico simulando a velocidade das gotículas de água na carcaça spray.

Através da (figura 94) pode-se observar pico da temperatura da chapa da carcaça spray próximo ao injetor de oxigênio, neste caso deve-se desconsiderar o aporte de calor gerado pelo rebote de chama do queimador.

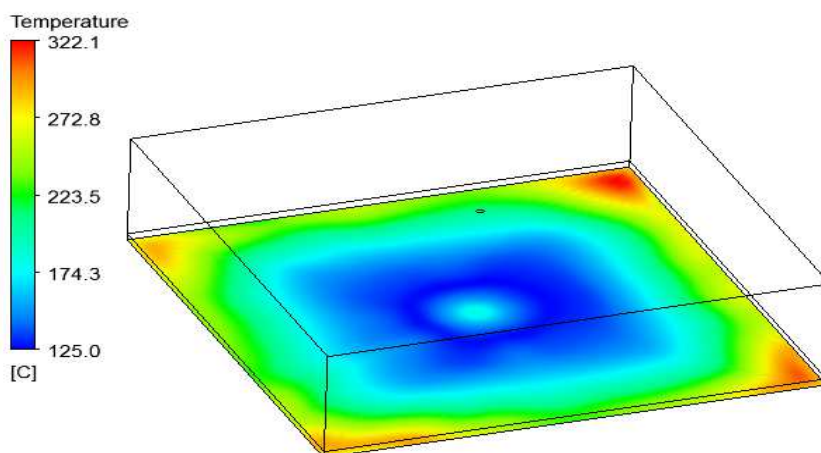


Figura 94 - Gráfico de Temperatura da chapa carcaça spray quando injetor de oxigênio esta operando em modo lança.

Conforme especificação para utilização da chapa a temperatura máxima de trabalho é 350°C, sendo assim, podemos concluir que o sistema de refrigeração ou aporte de energia química e elétrica utilizada no processo do forno fusão durante a fusão e refino do aço estão balanceada, tendo em vista

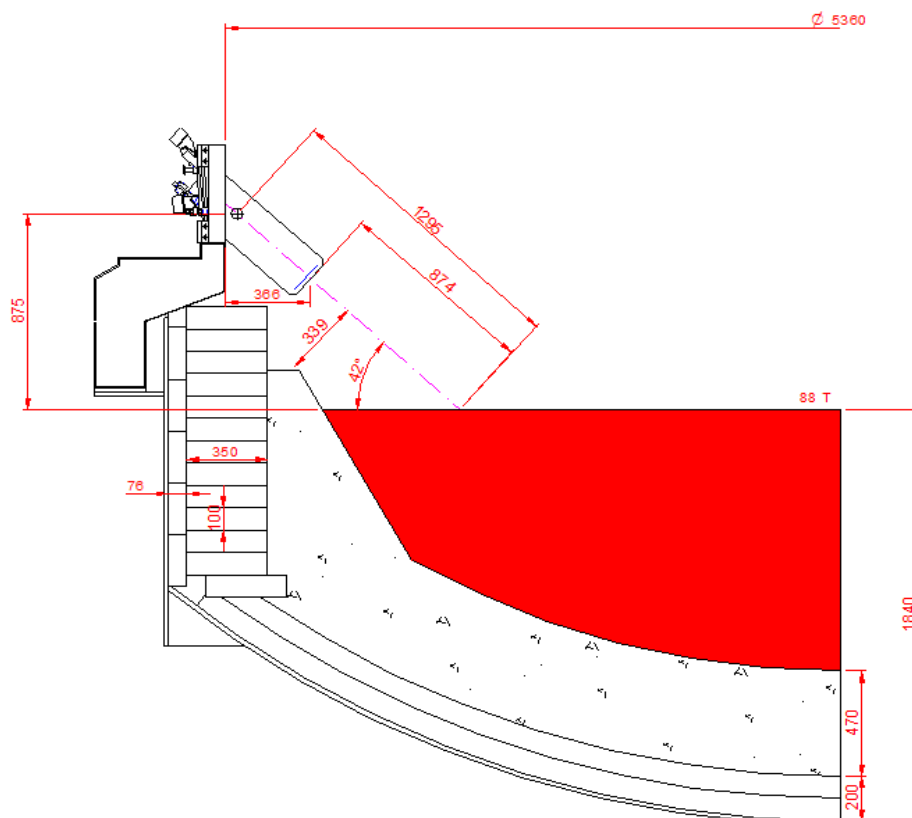


Figura 96 - Ilustração do Sistema proposto para injeção de gases no FEA

A simulação computacional foi realizada utilizando modelos euler-euler, o qual simplifica alguns fenômenos ocorridos na transferência de calor, mas não o invalida como ponto de partida para alguns estudos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

1 - Este trabalho permitiu conhecer melhor o processo do forno fusão a arco e seu principal desafio que é manter a carcaça metálica refrigerada minimizando riscos de acidente por contato da água de refrigeração com aço líquido no interior do forno;

2 - Permitiu comprovar, através da microscopia ótica, a não alteração da microestrutura do aço carbono ASTM A285C, quando empregado na atmosfera oxidante e contato com a carga fundida do FEA;

3 – Através da análise da composição química foi possível comprovar que o aço utilizado na construção da carcaça spray não condiz com o aço ASTM A285C especificado no projeto. Entretanto, a variação da composição química do material da carcaça metálica não contribui significativamente para a falha.

4 - Os ensaios de dureza e tração a frio permitiram comprovar que as características de resistência, ductilidade, limite de resistência à tração, limite de escoamento e tenacidade do material não sofreram influência das condições de operação do forno, estando em acordo com os critérios de qualidade previsto;

5 – O rebote das chamas geradas pelos injetores de oxigênio instalados na carcaça spray do forno é um fator importante causador de sobreaquecimento da chaparia, propiciando a falha;

6 - Os ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura, em acordo com resultado de microscopia ótica, permitiu concluir que não existe influencia de elementos componentes da carga metálica gerando formação de FeS e MnS na chapa de aço da carcaça spray;

Baseado em todas as evidências, tem-se como conclusão final que a falha na chapa metálica da carcaça spray não ocorre por variação dos ciclos térmicos normais durante o processo de fusão e refino e sim por aporte instantâneo de energia térmica de grande intensidade devido a rebote de oxigênio na chapa.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1- Realização de simulação numérica por volume finito em regiões do forno elétrico a arco simulando rebote de oxigênio na chaparia da carcaça spray;
- 2- Realizar estudo para avaliar a influência da espessura da camada de magnetita formada na face fria da chapa metálica da carcaça spray na taxa de transferência de calor durante o processo de resfriamento;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABM. **Tecnologia de Fabricação do Aço Líquido**, 2006.
- ABM. **Tecnologia de Fabricação do Aço Líquido**, 2007.
- BOWMAN, B. and K. KRUGER, **The General Scrap Meltdown Pattern, in Arc Furnace**, 1994.
- Byun, S., Ruffini, C., Mills, J.E., Douglas, A.C., Niang, M., Stepchenkova, S., Lee, S.K., Loutfi, J., Lee, J-K., Atallah, M., Blanton, M., (2009).
- COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. São Paulo, 1974.
- DANIELI; MORE; BSE; MPC. **Catálogos Diversos**, 2008.
- DE PLANCK, R. e SINGHEISER, L., 1987 in Ref. (SCHÜTZE, 2001).
- EAF TECHNOLOGY – IISI. **Tecnologia dos Fornos Elétricos a Arco**, 2000
- EUROPEAN ELECTRIC STEEL CONGRESS, 5. 1995.
- FELTRE, R. **Fundamentos da Química**, 2000.
- FIGUEIRAS, R. M. F. **Operação de Forno Elétrico a Arco**. São Paulo: Gerdau, 2007.
- Injection Technologies in Steelmaking**. Pittsburg, 1996.
- INCROPERA F., D.D., BERGMAN T., LAVINE A, Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa 6th ed. 2008.
- GRABKE, H. J. In: **Metallische und Nichtmetallische Werkstoffe und Ihre Verarbeitungsverfahren im Vergleich – Teil IV, Hochtemperaturverhalten**, VDI, SWALES, G. L. **Behaviour of High Temperature Alloys in Aggressive Environments**, (Eds), KIRMAN, I. et al., Metals Society, London, p. 45.
- Holman, Jack Philip – **Heat Transfer** – EUA, 1995.
- KOFSTAD, P. **High Temperature Corrosion**. Elsevier Applied Science. London, 1988.
- Konus Icesa **Manual de Transferência de Calor**, 2007.
- KUBASCHEWSKI, O.; ALCOCK, C. B. **Metallurgical Chemistry**, Pergamon Press, Oxford, 1979.
- Metal Fatigue in Engineering – FUCHS, STEPHENS – EUA, 2000.
- North American Combustion Handbook – EUA, 2008.
- PILLIS, M. F.; RAMANATHAN, L. V. **Microstructural Characterization of Reaction Products on Iron Based Alloys Exposed to H₂/H₂S Atmospheres at high temperature**. V. 5, Materials Research, 2002.

RAPP, R. A. AGARD Conf. Proc. No 120, **on High Temperature Corrosion of Aerospace Alloys**, 1972.

SCHÜTZE, M. **Protective Oxide Scales and Their Breakdown**. D. R. Holmes. Germany, 2001.

SESHADRI, V., R. PARREIRAS TAVARES, and C.A. SILVA, **Fenômenos de transporte: fundamentos e aplicações nas Engenharias Metalúrgica e de Materiais**. Coleção Metalurgia, Materiais e Mineração, ed. M.e.M. ABM - Associação Brasileira de Metalurgia. 2010.

Stress-Rupture Parameters: Origin, Calculation and Use – J.B.CONWAY – EUA, 2006.

Thermal Stress – BENHAM and HOYLE – EUA, 1998.